



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ
ΙΔΡΥΜΑ ΣΕΡΡΩΝ**

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ



ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ

ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

& ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ

ΔΙ-ΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Στέφανος Λάππας

Πτυχίο Γεωγραφίας Παν/μιου Αιγαίου

A.M.: 21309

**Διερεύνηση Κατολισθητικών Φαινομένων με χρήση Συμβολομετρίας
/ Ραντάρ, στην περιοχή της Ηλείας**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ιωάννης Παπανικολάου

**Επ. Καθηγητής Γεωπονικού Πανεπιστημίου
Αθηνών (Επιβλέπων)**

Εμμανουήλ Βασιλάκης

**Επ. Καθηγητής Τμήματος Γεωλογίας &
Γεωπεριβάλλοντος**

Μιχάλης Φουμέλης

**Ερευνητής Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας
Διαστήματος**

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2016



**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΕΑΕΚ**



**ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ
ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΗ
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ**



Η ΠΑΙΔΕΙΑ ΣΤΗΝ ΚΟΡΥΦΗ
Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Εκπαίδευσης και Αρχικής
Επαγγελματικής Κατάρτισης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Δι-ιδρυματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Πρόληψη και Διαχείριση Φυσικών Καταστροφών» του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού Και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και του Τμήματος Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Σερρών.

Τις τελευταίες δεκαετίες η διαφορική συμβολομετρία (Differential Interferometry - DInSAR) έχει αποδειχθεί ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη εδαφικών μετακινήσεων. Ιδιαίτερα, για την μελέτη των κατολισθήσεων αναπτύχθηκαν προηγμένες μέθοδοι διαφορικής συμβολομετρίας, που ονομάζονται τεχνικές Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας (Multi Temporal Interferometry – MTI). Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτών των τεχνικών είναι ότι περιορίζουν τα φαινόμενα χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης που χαρακτηρίζουν την κλασσική διαφορική συμβολομετρία. Βασική προϋπόθεση για την επιτυχή εκτέλεση των μεθόδων αυτών είναι η διαθεσιμότητα ενός πλούσιου αρχείου δορυφορικών απεικονίσεων SAR. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι αξιοποιούν πλήθος διαφορικών συμβολογραφημάτων και όχι μεμονωμένα γραφήματα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των κατολισθητικών φαινομένων με χρήση συμβολομετρίας, στο νομό Ηλείας. Για την επίτευξη του στόχου εφαρμόστηκαν δύο τεχνικές Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας: η μέθοδος Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων (Interferogram Stacking) και η μέθοδος Υποσυνόλου Μικρού Ανύσματος Βάσης (Small Baseline Subset). Ο κύριος λόγος που επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες μέθοδοι είναι ότι ελαχιστοποιούν τον θόρυβο στο οφείλεται στην επίδραση της ατμόσφαιρας, προσφέρουν την δυνατότητα μελέτης ολόκληρου της περιοχής, σε συνδυασμό με την μεγάλη ακρίβεια των μετρήσεων.

Η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων έγινε με τη χρήση της διαδικτυακής πλατφόρμας Grid Processing On Demand (G-POD) της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency - ESA). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν απεικονίσεις SAR του δορυφόρου ENVISAT, ανοδικής και καθοδικής τροχιάς, το διάστημα 2002 – 2010.

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε ο νομός Ηλείας, καθώς αποτελεί ιδανική περιοχή για την εφαρμογή της μεθόδου της διαφορικής συμβολομετρίας. Έχουν καταγραφεί πολυάριθμα κατολισθητικά γεγονότα σε βάθος χρόνου, εξαιτίας του γεωλογικού υποβάθρου, αλλά και των έντονων βροχοπτώσεων. Ο κυριότερος λόγος όμως είναι ότι επλήγει από τις καταστροφικές πυρκαγιές που σημειώθηκαν στην Πελοπόννησο το 2007. Εντός των πυρόπληκτων περιοχών καταγράφηκαν πολλά φαινόμενα κατολισθήσεων, τα οποία οφείλονται στη επίδραση της πυρκαγιάς (καταστροφή της βλάστησης, μεταβολή της σύστασης του εδάφους).

Μέσω των μεθόδων, ιδιαίτερα της τεχνικής SBAS δημιουργήθηκαν χάρτες εδαφικής παραμόρφωσης, όπου έγινε προσπάθεια να εντοπιστούν κατολισθητικά φαινόμενα στην περιοχή μελέτης. Παράλληλα η μελέτη των χρονοσειρών παραμόρφωσης συνέβαλε στην κατανόηση της συμπεριφοράς των μετακινήσεων σε επιλεγμένα σημεία. Βάσει των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι πολλές περιοχές εντός του νομού παρουσιάζουν φαινόμενα αρνητικής μετατόπισης, ιδιαίτερα εντός των καμένων εκτάσεων. Επίσης, ήταν εμφανής η επίδραση τόσο των πυρκαγιών του 2007, όσο και του σεισμού της Ανδραβίδας που σημειώθηκε τον Ιούνιο του 2008.

Τέλος, αποδείχθηκε ότι παρά τα προβλήματα και τους περιορισμούς που αναδείχθηκαν σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, η μέθοδος της Διαφορικής Συμβολομετρίας αποτελεί μια σημαντική τεχνική για την μελέτη των κατολισθήσεων, καθώς υπερτερεί έναντι των συμβατικών μεθόδων παρακολούθησης (GPS, τοπογραφικές μελέτες κ.α).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την τριμελή μου επιτροπή και ιδιαίτερα τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Παπανικολάου Ιωάννη, τόσο για την επίβλεψη της διπλωματικής, όσο και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναλαμβάνοντας την παρούσα εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Βασιλάκη Μανώλη για τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής. Πολύ περισσότερο θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Φουμέλη Μιχάλη Ερευνητή στην Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος, χωρίς την συμβολή του οποίου η εκπόνηση της διπλωματικής θα ήταν αδύνατη. Θέλω να τον ευχαριστήσω για τις αμέτρητες και πολύωρες συζητήσεις μέσω διαδικτύου για θέματα συμβολομετρίας, για τις συνεχείς συμβουλές του, αλλά και για την πολύτιμη βοήθειά του στα προβλήματα που ανέκυπταν συνεχώς.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω και την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (ESA) για την διάθεση των δεδομένων, αλλά και για την έγκριση χρήσης των υπηρεσιών της διαδικτυακής πλατφόρμα Grid Processing On Demand (G-POD). Θα ήταν μεγάλη παράλειψη αν δεν ευχαριστούσα τους ερευνητές της ESA και το σύνολο της ομάδας υποστήριξης της εν λόγω πλατφόρμας (G-POD Team). Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους κυρίους Francesco Casu και Roberto Coccu για την άμεση ανταπόκρισή τους σε όποια τεχνικά προβλήματα συνάντησα, αλλά για τις τυχόν απορίες που είχα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
-----------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Συστήματα Ραντάρ - Συμβολομετρία

1.1 Εισαγωγή.....	14
1.2 Συστήματα Εικονοληπτικών Ραντάρ	15
1.3 Συστήματα Εικονοληπτικών Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος Κεραίας (SAR).....	17
<i>1.3.1</i> Γεωμετρία Συστημάτων Εικονοληπτικών SAR.....	17
<i>1.3.2</i> Διαχωριστική Ικανότητα.....	19
<i>1.3.3</i> Χαρακτηριστικά SAR απεικονίσεων.....	21
<i>1.3.4</i> Παραμορφώσεις στις εικόνες SAR.....	24
<i>1.3.5</i> Ο δορυφόρος ENVISAT.....	25
1.4 Συμβολομετρία Εικονοληπτικών Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος Κεραίας (SAR).....	27
<i>2.4.1</i> Άνυσμα Βάσης.....	29
<i>2.4.2</i> Υψόμετρο Αμφισημίας.....	30
<i>2.4.3</i> Συνάφεια.....	31
<i>2.4.4</i> Παράγοντες αποσυσχέτισης συμβολομετρικής φάσης.....	31
1.5 Διαφορική Συμβολομετρία Εικονοληπτικών SAR (DInSAR).....	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Κατολισθήσεις και Μετακινήσεις Μαζών

2.1 Εισαγωγή.....	40
2.2. Ταξινόμηση Κατολισθήσεων.....	40
2.3 Ενεργότητα Κατολισθήσεων.....	45
2.4 Ταχύτητα Κατολισθήσεων.....	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Εφαρμογή Διαφορικής Συμβολομετρίας στη Μελέτη Κατολισθήσεων

3.1	Εισαγωγή.....	48
3.2	Μέθοδοι Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας (MTI).....	49
3.3	Μέθοδος Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων (Interferogram Stacking).....	53
3.4	Μέθοδος Συμβολομετρίας Σταθερών Ανακλαστήρων (Permanent Scatterers DInSAR)	55
3.5	Μέθοδος Μικρού Ανύσματος Βάσης (Small Baseline Subset).....	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Περιοχή Μελέτης

4.1	Ανθρωπογεωγραφικά Χαρακτηριστικά Ν. Ηλείας.....	57
4.2	Χρήσεις Γης Ν. Ηλείας.....	61
4.3	Μετεωρολογικά Δεδομένα Ν. Ηλείας.....	63
4.4	Γεωλογία και Τεκτονική Ν. Ηλείας.....	67
4.5	Ιστορικό Κατολισθητικών Φαινομένων Ν. Ηλείας.....	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Μεθοδολογία

5.1	Δεδομένα SAR απεικονίσεων.....	90
5.2	Μεθοδολογία Παραγωγής Διαφορικού Συμβολογραφήματος (GAMMA DInSAR).....	94
5.3	Μεθοδολογία Σώρευσης Συμβολογραφημάτων (Stacking).....	107
5.4	Μεθοδολογία Μικρού Ανύσματος Βάσης (SBAS).....	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Αποτελέσματα

6.1	Αποτελέσματα GAMMA DInSAR.....	113
6.2	Αποτελέσματα SBAS.....	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Συζήτηση.....

149

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – Συμπεράσματα.....

154

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....

157

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

<u>Χάρτης 4.1</u> : Οικισμοί και οδικό δίκτυο νομού Ηλείας.....	58
<u>Χάρτης 4.2</u> : Ανάγλυφο περιοχής μελέτης.....	59
<u>Χάρτης 4.3</u> : Τοπογραφικές κλίσεις νομού Ηλείας.....	60
<u>Χάρτης 4.4</u> : Χρήσεις γης του νομού Ηλείας, σύμφωνα με το πρόγραμμα Corine 2006.....	64
<u>Χάρτης 4.5</u> : Χρήσεις γης και καμένες εκτάσεις μετά τις πυρκαγιές του 2007.....	66
<u>Χάρτης 4.6</u> : Ενοποιημένος γεωλογικός χάρτης νομού Ηλείας.....	71
<u>Χάρτης 4.7</u> : Ιστορικά σεισμικά γεγονότα περιόδου 1900 – 2009.....	78
<u>Χάρτης 4.8</u> : Καταγεγραμμένου ιστορικού κατολισθητικά συμβάντα στο νομό Ηλείας.....	88
<u>Χάρτης 5.1</u> : Περιοχή κάλυψης SAR απεικονίσεων.....	93
<u>Χάρτης 6.1</u> : Χάρτης συνάφειας συμβολογραφήματος εικόνων 11/1/2004 & 15/2/2004.....	114
<u>Χάρτης 6.2</u> : Διαφορικό συμβολογράφημα των εικόνων 11/01/2004 & 25/04/2004.....	115
<u>Χάρτης 6.3</u> : Χάρτης μετατοπίσεων του συμβολογραφήματος εικόνων 11/01/2004 & 25/04/2004.....	116
<u>Χάρτης 6.4</u> : Χάρτης συνάφειας συμβολογραφήματος εικόνων 6/4/2003 & 11/5/2003.....	118
<u>Χάρτης 6.5</u> : Διαφορικό συμβολογράφημα των εικόνων 6/4/2003 & 11/5/2003	119
<u>Χάρτης 6.6</u> : Χάρτης μετατοπίσεων του συμβολογραφήματος εικόνων 6/4/2003 & 11/5/2003	120
<u>Χάρτης 6.7</u> : Χάρτης συνάφειας συμβολογραφήματος εικόνων 11/1/2004 & 25/4/2004.....	122
<u>Χάρτης 6.8</u> : Διαφορικό συμβολογράφημα των εικόνων 11/1/2004 & 25/4/2004 ...	123
<u>Χάρτης 6.9</u> : Χάρτης μετατοπίσεων του συμβολογραφήματος εικόνων 11/1/2004 & 25/4/2004	124
<u>Χάρτης 6.10</u> : Χάρτης μέσης ταχύτητας παραμόρφωσης, δεδομένων ανοδικής τροχιάς.....	127
<u>Χάρτης 6.11</u> : Χάρτης μέσης ταχύτητας παραμόρφωσης, δεδομένων ανοδικής τροχιάς.....	129
<u>Χάρτης 6.12</u> : Γεωλογικός χάρτης και μέση ταχύτητα παραμόρφωσης.....	131
<u>Χάρτης 6.13</u> : Μέση ταχύτητα παραμόρφωσης εντός της βόρειας καμένης έκτασης.....	133

<u>Χάρτης 6.14</u> : Χάρτης μέσης ταχύτητας παραμόρφωσης, δεδομένων καθοδικής τροχιάς.....	135
<u>Χάρτης 6.15</u> : Γεωλογικός χάρτης και μέση ταχύτητα παραμόρφωσης δεδομένων καθοδικής τροχιάς.....	136
<u>Χάρτης 6.16</u> : Μέση ταχύτητα παραμόρφωσης εντός της νότιας καμένης έκτασης..	138

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<u>Πίνακας 1.1</u> : Συχνότητες και μήκη κύματος ανά φασματικό κανάλι ραντάρ.....	15
<u>Πίνακας 1.2</u> : Χαρακτηριστικά δορυφόρου ENVISAT.....	26
<u>Πίνακας 2.1</u> : Σύνομη ταξινόμηση των κατολισθητικών κινήσεων.....	44
<u>Πίνακας 2.2</u> : Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης.....	46
<u>Πίνακας 2.3</u> : Πιθανές βλάβες ανάλογα με την ταχύτητα μετακίνησης.....	47
<u>Πίνακας 4.1</u> : Ποσοστά χρήσεων γης νομού Ηλείας.....	65
<u>Πίνακας 4.2</u> : Οικισμοί που έχουν μετεγκατασταθεί λόγω κατολισθητικών φαινομένων.....	82
<u>Πίνακας 4.3</u> : Περιγραφή των κατολισθήσεων που αναγνωρίστηκαν από τους Derountis et al (2010).....	83
<u>Πίνακας 5.1</u> : Δεδομένα SAR απεικονίσεων ανοδικής τροχιάς.....	91
<u>Πίνακας 5.2</u> : Δεδομένα SAR απεικονίσεων καθοδικής τροχιάς.....	92
<u>Πίνακας 5.3</u> : Επιλογή κύριας εικόνας των δεδομένων ανοδικής τροχιάς.....	98
<u>Πίνακας 5.4</u> : Επιλογή κύριας εικόνας των δεδομένων καθοδικής τροχιάς.....	99
<u>Πίνακας 6.1</u> : Ποσοστό σημείων ανά κατηγορία ταχύτητας μετατόπισης.....	147
<u>Πίνακας 6.2</u> : Ποσοστό σημείων αρνητικής μετατόπισης ανά γεωλογικό σχηματισμό.....	147

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<u>Διάγραμμα 4.1</u> : Μέση μηνιαία βροχόπτωση περιόδου 1977 – 2010.....	61
<u>Διάγραμμα 4.2</u> : Μέγιστη ετήσια βροχόπτωση περιόδου 1977 – 2010.....	62
<u>Διάγραμμα 4.3</u> : Αθροιστική ετήσια βροχόπτωση περιόδου 1977 – 2010.....	62
<u>Διάγραμμα 5.1</u> : Κάθετο άνυσμα βάσης για κάθε εικόνα από την κύρια, των εικόνων ανοδικής τροχιάς.....	100
<u>Διάγραμμα 5.2</u> : Κάθετο άνυσμα βάσης για κάθε εικόνα από την κύρια, των εικόνων καθοδικής τροχιάς.....	101
<u>Διάγραμμα 6.1</u> : Χρονοσειρά μετατοπίσεων ανατολικής Ανδραβίδας.....	141

<u>Διάγραμμα 6.2:</u> Χρονοσειρά μετατοπίσεων κεντρικής Ανδραβίδας.....	141
<u>Διάγραμμα 6.3:</u> Χρονοσειρά μετατοπίσεων Αγίου Δημητρίου.....	142
<u>Διάγραμμα 6.4:</u> Χρονοσειρά μετατοπίσεων οικισμού Μηλιών.....	142
<u>Διάγραμμα 6.5:</u> Χρονοσειρά μετατοπίσεων οικισμού Ωλένης.....	144
<u>Διάγραμμα 6.6:</u> Χρονοσειρά μετατοπίσεων οικισμού Λάλα.....	144
<u>Διάγραμμα 6.7:</u> Χρονοσειρά μετατοπίσεων οικισμού Ροδινών.....	145
<u>Διάγραμμα 6.8:</u> Χρονοσειρά μετατοπίσεων οικισμού Αλιφείρας.....	145

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<u>Εικόνα 1.1:</u> Ραντάρ πραγματικού και συνθετικού ανοίγματος κεραίας.....	16
<u>Εικόνα 1.2:</u> Γεωμετρία σάρωσης εικονοληπτικού SAR.....	18
<u>Εικόνα 1.3:</u> Διαχωριστική ικανότητα στην διεύθυνση των αποστάσεων και στην διεύθυνση του αζιμούθιου.....	20
<u>Εικόνα 1.4:</u> Ανιούσα (ascending) και κατιούσα (descending) τροχιά του δορυφόρου και οι συνιστώσες της παραμόρφωσης.....	20
<u>Εικόνα 1.5:</u> Ικανότητα διείσδυσης των καναλιών X, L και C	21
<u>Εικόνα 1.6:</u> Η ημιτονοειδής συνάρτηση του σήματος με περίοδο 2π	23
<u>Εικόνα 1.7:</u> Γεωμετρικές παραμορφώσεις εικόνων SAR.....	25
<u>Εικόνα 1.8:</u> Ο δορυφόρος ENVISAT και τα επιμέρους όργανα που μεταφέρει.....	26
<u>Εικόνα 1.9:</u> Διαφορά φάσης εξαιτίας παραμόρφωσης του εδάφους.....	29
<u>Εικόνα 1.10:</u> Κάθετο άνυσμα βάσης (perpendicular baseline) μεταξύ των δύο δορυφόρων.....	30
<u>Εικόνα 4.1:</u> Επίκεντρο και μηχανισμός γένεσης σεισμού Ανδραβίδας το 2008.....	80
<u>Εικόνα 4.2:</u> Κατολισθήσεις εντός των πυρόπληκτων περιοχών σύμφωνα με τους Depountis et al (2010).....	86
<u>Εικόνα 5.1:</u> Επιλογή παραμέτρων υπηρεσίας GAMMA DInSAR.....	95
<u>Εικόνα 5.2:</u> Εφαρμογή φίλτρου στην διεύθυνση των αποστάσεων και του αζιμούθιου.....	103
<u>Εικόνα 5.3:</u> Παράμετροι της υπηρεσίας SBAS.....	109
<u>Εικόνα 5.4:</u> Τροχιές επιλεγμένων raw δεδομένων στην περιοχή μελέτης.....	110
<u>Εικόνα 5.5:</u> Στάδια της τεχνικής SBAS της αντίστοιχης υπηρεσίας της ESA.....	111

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια αύξηση φαινομένων που προκαλούνται από φυσικές καταστροφές. Η αύξηση αυτή οφείλεται αφ' ενός στην μεγαλύτερη συχνότητα εκδήλωσης των φαινομένων, αλλά αφ' ετέρου στην μεγαλύτερη και καλύτερη καταγραφή των γεγονότων, είτε από τα μέσα μαζικής επικοινωνίας, είτε από επιστημονικούς φορείς. Γι' αυτό το λόγο έχουν αυξηθεί και οι εργασίες καταγραφής και μελέτης των φαινομένων αυτών.

Στον Ελληνικό χώρο, εξαιτίας της γεωγραφικής θέσης που κατέχει και του ιδιαίτερου γεωδυναμικού χαρακτήρα της περιοχής, οι καταστροφές που παρατηρούνται προκαλούνται κυρίως από σεισμούς, πλημμύρες, πυρκαγιές και κατολισθήσεις, χωρίς ωστόσο να αποκλείονται άλλοι κίνδυνοι όπως ερημοποίηση, παγετός κ.α. Στους περισσότερους από τους παραπάνω κινδύνους ο γεωγραφικός χώρος εμφάνισης είναι γνωστός, ενώ λείπει η γνώση σχετικά με την συχνότητα εμφάνισης των γεγονότων (πότε) και το μέγεθος του εκάστοτε γεγονότος (πόσο).

Στην Ελλάδα οι κατολισθήσεις αποτελούν ιδιαίτερα καταστροφικό γεωλογικό φαινόμενο με ποικίλες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις. Κατολισθήσεις εκδηλώνονται σε όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς, αλλά ιδιαίτερα το φαινόμενο παρατηρείται στην Δυτική και Κεντρική Ελλάδα. Σε αυτό συμβάλλουν διάφοροι παράγοντες όπως η νεαρή ηλικία και η γεωλογική σύσταση των σχηματισμών, η δράση των τεκτονικών δυνάμεων, η γεωμορφολογική εξέλιξη και οι υψηλές βροχοπτώσεις.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα κατολισθητικά συμβάντα που έχουν καταγραφεί δεν έχουν προκαλέσει ανθρώπινες απώλειες, καθιστά το κίνδυνο λιγότερο γνωστό στο ευρύ κοινό. Αντιθέτως όμως, η επιστημονική κοινότητα, αλλά και οι τοπικοί πληθυσμοί που επηρεάζονται από τα γεγονότα κατανοούν πλήρως το μέγεθος του κινδύνου.

Τα αίτια εκδήλωσης των αστοχιών αυτών αποτελούν συνδυασμό παραγόντων όπως i) η παρουσία γεωλογικών σχηματισμών με υποβαθμισμένα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά, ii) η αλληλουχία γεωλογικών σχηματισμών με διαφορετική γεωμηχανική συμπεριφορά κατά την κατακόρυφο και οριζόντια διάσταση, iii) οι διεργασίες αποσάθρωσης και διάβρωσης, iv) η έντονη τεκτονική καταπόνηση, v) τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που σημειώνονται στην περιοχή, vi) οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως, η αποψίλωση εκτάσεων για την επέκταση καλλιεργειών και η διάνοιξη δρόμων και vii) η σεισμική δραστηριότητα.

Σήμερα, η ανάγκη ουσιαστικής έρευνας των κατολισθητικών φαινομένων στην Ελλάδα είναι επιτακτική και επιβάλλεται λόγω κυρίως των επιπτώσεων στις ανθρωπογενείς δομές (οδικά δίκτυα, οικισμοί, δίκτυα κοινής ωφέλειας). Επίσης μεγάλη είναι και η ανάγκη λήψης μέτρων προστασίας ή ακόμα και αποτροπής του φαινομένου, γεγονός που επιτυγχάνεται με την επιστημονική ανάλυση των παραγόντων που το συνθέτουν και την επιτυχή αντιμετώπιση με τα μέτρα αναστολής που ενδείκνυνται σε κάθε περίπτωση.

Η χρήση των παραδοσιακών μεθόδων καταγραφής των εδαφικών παραμορφώσεων, όπως τοπογραφικές μελέτες, μετρήσεις πεδίου με GPS, επιταχυνσιόμετρα κ.α. είναι αποτελεσματικές, αλλά σε μικρή κλίμακα. Η εφαρμογή τους για την μελέτη μεγαλύτερων εκτάσεων και την εκτίμηση της παραμόρφωσης σε μεγαλύτερη κλίμακα και σε βάθος χρόνου είναι οικονομικώς ασύμφορη, χρονοβόρα, ενώ σε πολλές περιπτώσεις είναι και πρακτικά αδύνατη. Γι' αυτόν τον λόγο έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές παρακολούθησης κατολισθητικών φαινομένων με την χρήση δορυφορικών δεδομένων (είτε οπτικά δεδομένα, είτε δεδομένα ραντάρ).

Από τις αρχές της δεκαετίας του '90 η Διαφορική Συμβολομετρία (Differential Interferometry – DInSAR) έχει ήδη αποδειχθεί αποτελεσματική στην μέτρηση επιφανειακών παραμορφώσεων που προκαλούνται από σεισμούς και ηφαίστεια. Η διαφορική συμβολομετρία αξιοποιεί την διαφορά φάσης στο σήμα που προκαλείται από την εδαφική παραμόρφωση μεταξύ δύο διαφορετικών δορυφορικών λήψεων ραντάρ, πάνω από την ίδια περιοχή. Κυρίως χρησιμοποιούνται δεδομένα από εικονοληπτικά ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture Radar – SAR), καθώς παρέχουν την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια μετρήσεων.

Η διάθεση μεγάλων σετ δεδομένων με βάθος χρόνου, σε συνδυασμό με την εξέλιξη των αλγορίθμων επεξεργασίας κατέστησαν την Διαφορική Συμβολομετρία αποτελεσματικό εργαλείο για την ακριβή μέτρηση των επιφανειακών παραμορφώσεων. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης των εδαφικών παραμορφώσεων, μεγάλων εκτάσεων μεγάλα χρονικά διαστήματα παρατήρησης. Με την παραγωγή χρονοσειρών παραμόρφωσης μελετάται η μακροχρόνια εξέλιξη των φαινομένου, συμβάλλοντας στην κατανόηση της συμπεριφοράς αυτού.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί διάφορες εξελιγμένες μεθοδολογίες διαφορικής συμβολομετρίας για την παρακολούθηση και καταγραφή των κατολισθητικών φαινομένων. Ονομάζονται τεχνικές Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας (Multi-Temporal Interferometry – MTI), καθώς αξιοποιούν πλήθος διαφορικών συμβολογραφημάτων για την διαχρονική μελέτη των παραμορφώσεων. Χαρακτηριστικές είναι η Σώρευση Συμβολογραφημάτων (Interferogram Stacking), η Συμβολομετρία Μόνιμων Σκεδαστών (Permanent Scatterers DInSAR – P.S. DInSAR) και η τεχνική του Μικρού Ανύσματος Βάσης (Small BAseline Subset – SBAS).

Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η καταγραφή των κατολισθητικών φαινομένων με την χρήση της διαφορικής συμβολομετρίας, στον Νομό Ηλείας. Μέσω της εργασίας γίνεται προσπάθεια να εντοπιστούν οι εδαφικές παραμορφώσεις που οφείλονται στις κατολισθήσεις, ενώ παράλληλα επιδιώκεται και η διαχρονική εξέλιξη του ρυθμού ολίσθησης μέσω την ανάλυση χρονοσειρών. Για την επίτευξη των παραπάνω εφαρμόζονται τεχνικές Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας και πιο συγκεκριμένα οι μέθοδοι Σώρευσης Συμβολογραφημάτων (Interferogram Stacking) και Μικρού Ανύσματος Βάσης (Small Baseline Subset – SBAS).

Οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόζονται αξιοποιώντας τις υπηρεσίες GAMMA DInSAR και SBAS αντίστοιχα, της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency – ESA). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν απεικονίσεις SAR της ανοδικής και καθοδικής τροχιάς του δορυφόρου ENVISAT, την χρονική περίοδο 2002 – 2010.

Για την επίτευξη του σκοπού της μελέτης τέθηκαν τα ακόλουθα ερωτήματα εργασίας:

- Ποια είναι η διαχρονική εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων ;
- Υπάρχει μεταβολή στον αριθμό και στην εξέλιξη των φαινομένων μετά τις καταστροφικές πυρκαγιές του 2007 ;
- Υπάρχει μεταβολή στον αριθμό και στην εξέλιξη των φαινομένων μετά τον σεισμό της Ανδραβίδας το 2008, μεγέθους 6.4 ;
- Ποιοι περιορισμοί υπάρχουν στην εφαρμογή της μεθόδου ;
- Ποια είναι η καταλληλότερη μέθοδος διαφορικής συμβολομετρίας (Σώρευση , SBAS) ;

Επιλογή περιοχής μελέτης

Η εφαρμογή των μεθόδων Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας στον νομό Ηλείας είναι καινοτόμος, καθώς προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων. Αρχικά δίνεται η δυνατότητα μελέτης όλης της έκτασης του νομού, γεγονός το οποίο θα ήταν αδύνατο με τις κλασικές μεθόδους. Επίσης, προσφέρει το πλεονέκτημα μετρήσεων μεγάλης ακρίβειας, παρά το μεγάλο μέγεθος της περιοχής μελέτης. Εξαιτίας του γεγονότος ότι χρησιμοποιούνται δεδομένα σε βάθος δεκαετίας είναι δυνατή η διαχρονική μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων, και όχι μόνο του σημερινού καθεστώτος. Τέλος, ένα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι μετράται η μετατόπιση και σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου είναι δύσκολη έως αδύνατη η πρόσβαση για επίγειες μετρήσεις.

Ο λόγος που επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης ο Νομός Ηλείας είναι ότι βρίσκεται στην Δυτική Ελλάδα, όπου παρατηρούνται τα περισσότερα κατολισθητικά συμβάντα. Στην Ηλεία έχει καταγραφεί μεγάλος αριθμός κατολισθήσεων και καθιζήσεων συγκριτικά με τους υπόλοιπους νομούς της δυτικής Πελοποννήσου (Αχαΐα, Μεσσηνία). Στον νομό Ηλείας, εκτός των καταγεγραμμένων συμβάντων, έχουν πραγματοποιηθεί και μετεγκαταστάσεις οικισμών εξαιτίας των φαινομένων αυτών.

Ο νομός Ηλείας δομείται κυρίως από ιζήματα του Τεταρτογενούς, που χαρακτηρίζονται από κακή μηχανική συμπεριφορά. Παράλληλα, υπάρχουν και εμφανίσεις φλύσχη (Ζώνη Πίνδου, Γαβρόβου – Τριπόλεως), σχηματισμός στον οποίο καταγράφονται πολλές αστοχίες. Επίσης, στον νομό καταγράφονται και μεγάλα ύψη βροχόπτωσης (όπως και στην υπόλοιπη δυτική Ελλάδα), με την ταυτόχρονη εκδήλωση ραγδαίων βροχοπτώσεων, που αποτελούν παράγοντα εναύσματος των κατολισθήσεων. Ο συνδυασμός των παραπάνω παραγόντων με την ανθρώπινη παρέμβαση στο περιβάλλον (ανάπτυξη οδικού δικτύου & οικισμών), οδηγεί στην εκδήλωση πολλών φαινομένων στην περιοχή.

Επιπρόσθετα, ο νομός επλήγη από τις καταστροφικές πυρκαγιές του 2007, που εκδηλώθηκαν στην Πελοπόννησο. Το μέγεθος των καμένων εκτάσεων εντός του νομού είναι μεγαλύτερο από όλους τους νομούς που επλήγησαν. Η αφαίρεση της βλάστησης, σε συνδυασμό με την καταστροφική επίδραση της πυρκαγιάς στο έδαφος είχε σαν αποτέλεσμα να ενταθεί το φαινόμενο των κατολισθήσεων στις καμένες περιοχές. Εντός των καμένων εκτάσεων παρατηρήθηκε αύξηση του αριθμού των κατολισθήσεων και των αστοχιών, ενώ παράλληλα ενεργοποιήθηκαν και παλαιότερες κατολισθήσεις.

Ένας ακόμη λόγος που επιλέχθηκε η συγκεκριμένη περιοχή είναι η ότι οι μέχρι τώρα μελέτες καταγραφής των συμβάντων επικεντρώνονται εντός των οικισμών και κατά μήκος του οδικού δικτύου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μη ολοκληρωμένη εικόνα του κινδύνου εντός της περιοχής, καθώς αποκλείονται οι εκτάσεις που βρίσκονται μακριά από οικισμούς και δρόμους και δεν υπάρχει πρόσβαση σ' αυτές. Η εφαρμογή της μεθόδου δύναται να καλύψει τα κενά αυτά, καθώς τα δεδομένα ραντάρ καλύπτουν όλη την έκταση του Νομού Ηλείας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΡΑΝΤΑΡ - ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Η λέξη RADAR είναι το ακρώνυμο των αγγλικών λέξεων RAdio Detection And Ranging. Πρόκειται για ένα ενεργητικό εικονοληπτικό σύστημα που εκπέμπει μικροκυματική ακτινοβολία σε συγκεκριμένη συχνότητα προς την επιφάνεια της γης. Στη συνέχεια καταγράφει την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία, δηλαδή το ποσό της ακτινοβολίας που επιστρέφει στο ραντάρ, και η οποία προέρχεται από ανάκλαση στις διάφορες επιφάνειες (Μερτίκας, 1999, Δεληκαράογλου, 2015).

Η διαφορά του ραντάρ από τα άλλα συστήματα τηλεπισκόπησης έγκειται στο γεγονός ότι το ραντάρ είναι ενεργό σύστημα. Παρέχοντας τη δική του ακτινοβολία, λειτουργεί ανεξάρτητα από το ηλιακό φως και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Κατά κανόνα η λήψη δύναται να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων Ραντάρ είναι η ικανότητά τους να καταγράφουν την ακτινοβολία ανεξαρτήτως των καιρικών συνθηκών και της νεφοκάλυψης που επικρατούν στην ατμόσφαιρα, γι' αυτό και ονομάζονται παντός καιρού (ESA, 2007, Δεληκαράογλου, 2015). Αυτό συμβαίνει διότι η ατμοσφαιρική απορρόφηση και σκέδαση είναι ελάχιστες στην ζώνη των μικροκυμάτων.

Μια άλλη διαφορά είναι ότι το ραντάρ καταγράφει δεδομένα με βάση τον χρόνο μετάβασης και επιστροφής του σήματος και όχι με βάση τη γωνιακή απόσταση, όπως γίνεται στις φωτογραφικές μηχανές. Τα δεδομένα που λαμβάνονται με χρήση του χρόνου μετάβασης, είναι πιο εύκολο να ερμηνευτούν και να επεξεργαστούν, σε αντίθεση με αυτά που βασίζονται στη γωνιακή απόσταση (Μερτίκας, 1999).

Ένα τυπικό σύστημα ραντάρ αποτελείται από μία συσκευή παραγωγής μικροκυματικής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία εκπέμπεται από έναν πομπό εκπομπής-λήψης με ηλεκτρονικό διακόπτη μετάπτωσης λειτουργίας. Ο πομπός, μεταβιβάζει την ακτινοβολία σε μία κατευθυνόμενη κεραία η οποία μεταδίδει τον παλμό στο στόχο. Οι ανακλώμενοι παλμοί συλλέγονται από την ίδια κεραία και μεταβιβάζονται στον δέκτη ο οποίος τους ενισχύει και τους μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα. Το σήμα τελικά καταγράφεται σε φιλμ ή σε ηλεκτρονικό μέσο.

Η χρονική διάρκεια κάθε παλμού είναι της τάξης των μsec και η ταχύτητα διάδοσής του είναι ίση με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός. Το πλάτος του σήματος εξαρτάται από την ένταση του λαμβανόμενου παλμού. Σε κάθε λαμβανόμενο παλμό αντιστοιχεί μία γραμμή σάρωσης του φιλμ (Μερτίκας, 1999).

Το ραντάρ χρησιμοποιεί παλμούς μονοχρωματικής ακτινοβολίας σε κανονικά χρονικά διαστήματα από πομποδέκτη μεταφερόμενο από αεροσκάφος ή δορυφόρο. Η ακτινοβολία αυτή, επιλέγεται να ανήκει σε συγκεκριμένες ζώνες μήκους κύματος, τα κανάλια ή μπάντες (bands) (Πίνακας 1).

Πίνακας 1.1: Συχνότητες και μήκη κύματος ανά φασματικό κανάλι ραντάρ.

Κανάλι	Συχνότητα (GHz)	Μήκος κύματος (cm)
Ka	26.5 - 40	0.45 - 1.18
K	18 - 26.5	1.18 - 1.67
Ku	12.5 - 18	1.67 - 2.40
X	8 - 12.5	2.40 - 3.75
C	4 - 8	3.75 - 7.5
S	2 - 4	7.5 - 15
L	1 - 2	15 - 30
UHF	0.3 - 1	30 - 100
P	0.28 - 0.39	77 - 107
VHF	0.03 - 0.30	100 - 10000

Η ικανότητα διείσδυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας σε βροχοπτώσεις και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, αυξάνεται με το μήκος κύματος. Κατά συνέπεια, τα μικροκύματα με μεγάλο μήκος κύματος, όπως τα L και τα P, έχουν την ικανότητα να διαπερνούν σε βάθος, επιφάνειες όπως άμμο, χιόνι και βλάστηση (Μερτίκας, 1999).

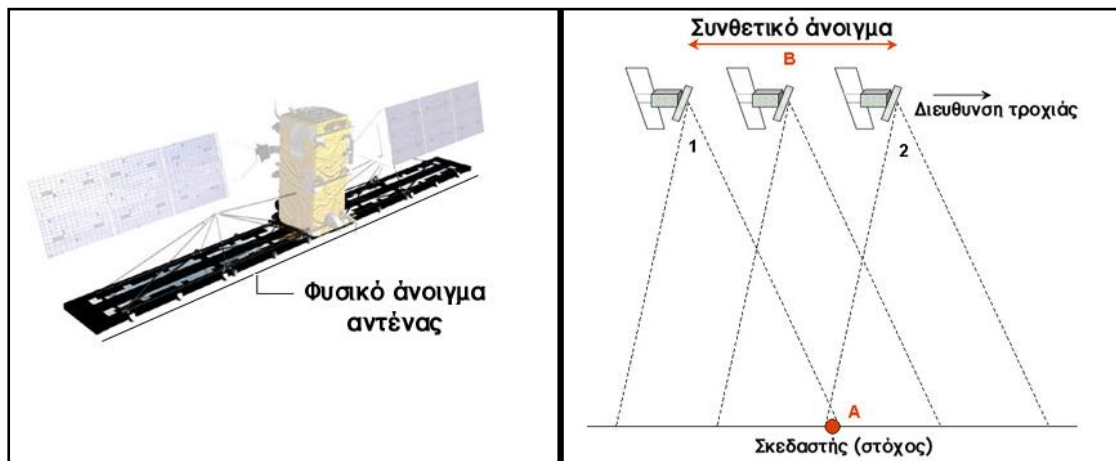
1.2 Συστήματα εικονοληπτικών ραντάρ

Υπάρχουν δύο είδη εικονοληπτικών συστημάτων RADAR που χρησιμοποιούνται στη δορυφορική τηλεπισκόπηση. Τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος κεραίας (Real Aperture Radar - RAR) και τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Synthetic Aperture - SAR).

Τα ραντάρ πραγματικού ανοίγματος κεραίας χρησιμοποιούν το μέγιστο δυνατό μήκος κεραίας προκειμένου να εκπέμψουν στενή δέσμη ακτινοβολίας και να επιτύχουν καλή διαχωριστική ικανότητα κατά τη διεύθυνση της τροχιάς. Η διάσταση της περιοχής που καλύπτεται από τη δέσμη ακτινοβολίας του ραντάρ εξαρτάται από το άνοιγμα της κεραίας και από το μήκος κύματος του παλμού. Όμως το μήκος της κεραίας στους δορυφόρους δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 15m λόγω τεχνικών περιορισμών. Το σχετικά μικρό μήκος της κεραίας αποτελεί και το περιοριστικό όριο στη χρήση των συστημάτων RAR.

Για την επίλυση του προβλήματος λόγω πεπερασμένου μεγέθους της κεραίας, αναπτύχθηκε η τεχνολογία του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος κεραίας SAR. Το SAR, χρησιμοποιώντας κεραία μικρού μήκους, μπορεί να συνθέσει μια πολύ μεγάλου μήκους ‘εικονική’ κεραία εκμεταλλευόμενο την πρόσω κίνηση του δορυφόρου και το φαινόμενο Doppler. Για παράδειγμα, με μία κεραία φυσικού μήκους 11m μπορεί να προσομοιωθεί κεραία 1,5km. Η πραγματική κεραία στο SAR εκπέμπει παλμούς μεγάλου γωνιακού εύρους κατά την εγκάρσια διεύθυνση της τροχιάς, σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η ακτίνα του SAR καλύπτει μεγάλη περιοχή στο έδαφος. Έτσι, ένας στόχος θα βρίσκεται στον χώρο της δέσμης φωτός της ακτινοβολίας για μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς θα μετακινείται ο δορυφόρος. Δεδομένου ότι ο δορυφόρος συνεχίζει να μετακινείται, καταγράφονται όλα τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματα από το στόχο, όσο αυτός βρίσκεται μέσα στη δέσμη ακτινοβολίας. Το σημείο στο οποίο ο στόχος βγαίνει από το εύρος της ακτινοβολίας, καθορίζει και το μήκος της συνθετικής κεραίας (Μερτίκας, 1999).

Όπως αναφέρεται στον Μερτίκα (1999), για ένα στόχο στην επιφάνεια του εδάφους, συμβαίνουν οι παρακάτω διακυμάνσεις στη συχνότητα που θα ανιχνεύσει το ραντάρ. Αρχικά ο στόχος θα εισέλθει στο οπτικό πεδίο του ραντάρ και το επιστρεφόμενο σήμα θα μετατοπιστεί προς υψηλότερες συχνότητες λόγω της θετικής συμβολής Doppler. Όταν ο δορυφόρος θα βρίσκεται στο σημείο εγγύτερης απόστασης από το στόχο, δε θα εμφανίζεται το φαινόμενο Doppler και δε θα υπάρχει μετατόπιση στη συχνότητα σε σχέση με αυτή του εκπεμπόμενου παλμού. Τέλος, όταν ο δορυφόρος απομακρύνεται από το στόχο, οι συχνότητες του σήματος επιστροφής θα παρουσιαστούν μετατοπισμένες προς χαμηλότερες συχνότητες λόγω του αρνητικού Doppler.



Εικόνα 1.1: Ραντάρ πραγματικού και συνθετικού ανοίγματος κεραίας (Δεληκαράογλου, 2015).

Οι στόχοι που βρίσκονται στην άπω περιοχή όπου το εύρος της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερο, θα 'φωτιστούν' για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από εκείνους που βρίσκονται στην εγγύς περιοχή. Το εκτεταμένο εύρος της δέσμης του σήματος είναι ανάλογο με τη χρονική διάρκεια έκθεσης στην ακτινοβολία έτσι ώστε η χωρική διαχωριστική ικανότητα να παραμένει σταθερή σε όλο το εύρος σάρωσης.

Η πολλαπλή ηχώ που οφείλεται στον στόχο από διαφορετικούς παλμούς αθροίζονται συμφασικά, ώστε να προκύψει η μέγιστη δυνατή εστίαση της απόκρισης του στόχου στην διεύθυνση του αζιμουθίου. Στο παραπάνω γεγονός οφείλεται και η δυνατότητα των συστημάτων SAR να συνθέτουν εικόνες υψηλής αζιμουθιακής διακριτικής ικανότητας για σχετικά ευρείες γεωγραφικές εκτάσεις, ανεξάρτητα από την απόστασή τους από την επιφάνεια.

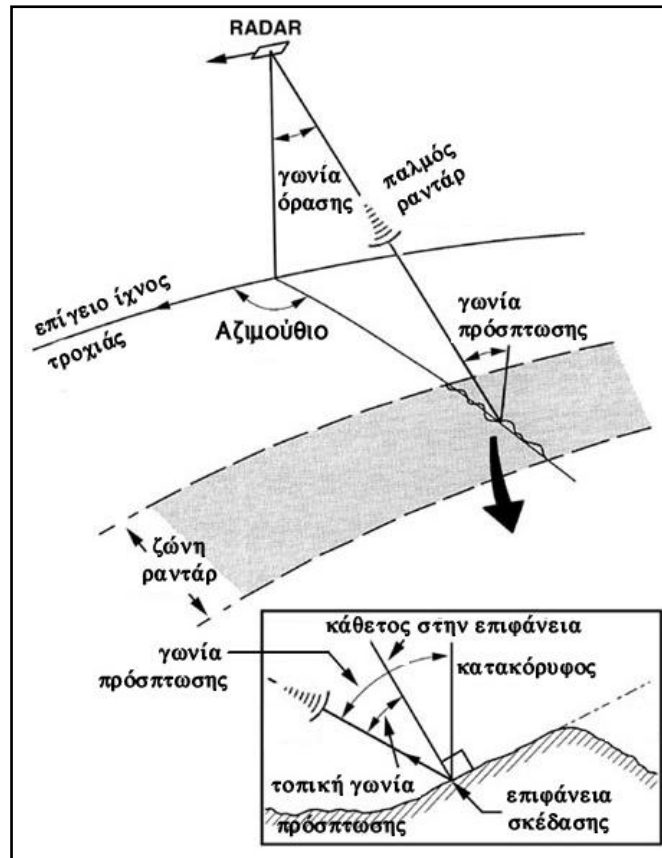
1.3 Συστήματα Εικονοληπτικών Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος Κεραίας (SAR)

1.3.1 Γεωμετρία Συστημάτων Εικονοληπτικών SAR

Τα συστήματα SAR χρησιμοποιούν μονοχρωματική μικροκυματική σύμφωνη ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος (λ). Το μήκος κύματος καθορίζει τα χαρακτηριστικά της σκέδασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας καθώς και το βάθος διείσδυσης στην μάζα του εκάστοτε στόχου (Μερτίκας, 1999).

Τα Ραντάρ συνθετικής απεικόνισης, σε αντίθεση με τους οπτικούς σαρωτές, εκπέμπουν και λαμβάνουν την ακτινοβολία με πλάγια προοπτική (υπό δεξιά γωνία της κίνησης του δορυφόρου) και εγκάρσια της τροχιάς του δορυφόρου. Η λήψη των απεικονίσεων πραγματοποιείται είτε κατά την καθοδική τροχιά (Borrá προς Νότο), ή κατά την ανοδική (Νότο προς Borrá) (ESA, 2007).

Ένα σύστημα Ραντάρ σαρώνει μια περιοχή της επιφάνειας της Γης η οποία καλείται ίχνος της κεραίας (antenna footprint). Η διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου καλείται διεύθυνση αζιμουθίου της απεικόνισης (azimuth direction ή along track direction). Η κάθετη προς την διεύθυνση του αζιμουθίου ονομάζεται διεύθυνση των αποστάσεων (range direction ή across-track direction). Η μέτρηση των αποστάσεων γίνεται, είτε στην επιφάνεια του εδάφους (ground range direction), είτε κατά μήκος της διεύθυνσης παρατήρησης των κεκλιμένων αποστάσεων (slant range direction) (ESA, 2007).



Εικόνα 1.2: Γεωμετρία σάρωσης εικονοληπτικού SAR (Δεληκαράογλου, 2015).

Το τμήμα της σάρωσης της εικόνας που είναι εγγύτερα στο ναδίρ της πλατφόρμας του ραντάρ, ονομάζεται εγγύς περιοχή (near range), ενώ το τμήμα της σάρωσης που είναι μακρύτερα από το ναδίρ, ονομάζεται άπω περιοχή (far range).

Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) είναι η γωνία του σήματος του ραντάρ με την κάθετο στην επιφάνεια της γης, η οποία αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την εγγύς περιοχή. Η γωνία παρατήρησης (look angle) είναι η γωνία με την οποία το ραντάρ παρατηρεί τη γήινη επιφάνεια και αυξάνει από την εγγύς προς την άπω περιοχή. Η γωνία παρατήρησης είναι μία από τις θεμελιώδεις παραμέτρους των εικόνων SAR, καθώς επηρεάζει την ένταση της οπισθοσκέδασης (backscattering) (ESA, 2007).

1.3.2. Διαχωριστική Ικανότητα

Ως διαχωριστική ικανότητα ή χωρική ανάλυση ενός συστήματος SAR ορίζεται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο φυσικών αντικειμένων ίσης ανακλαστικότητας που δύναται να εμφανισθούν μεμονωμένα σε απεικονίσεις Ραντάρ (Μερτίκας, 1999).

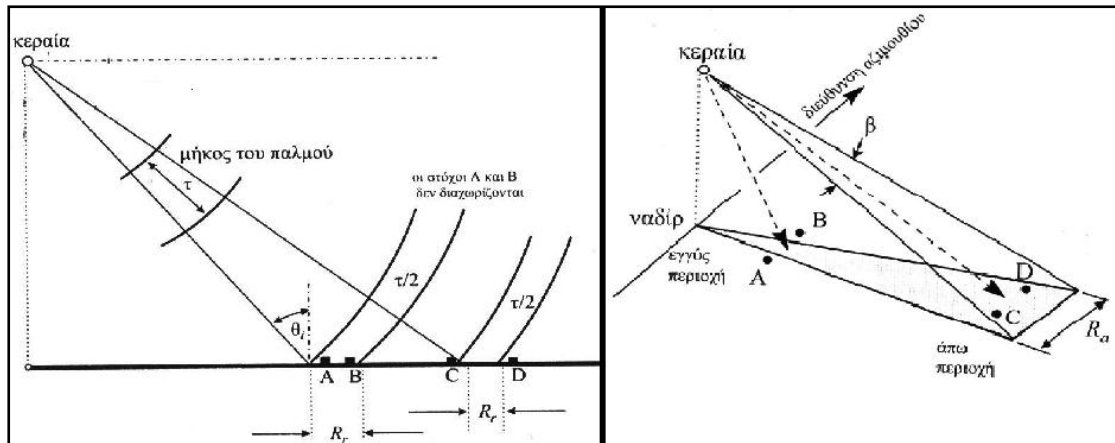
Η χωρική διακριτική ικανότητα (και στις δύο διευθύνσεις) ενός συστήματος Ραντάρ εξαρτάται από την γεωμετρία του αισθητήρα, τις ιδιότητές της μικροκυματικής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και από τα χαρακτηριστικά των εκπεμπόμενων παλμών. Καθώς ένα σύστημα Ραντάρ εκπέμπει και λαμβάνει ακτινοβολία με εγκάρσια προοπτική, αποφεύγεται ο κορεσμός του σήματος, το οποίο ενδέχεται να προκύψει εάν ο αισθητήρας λάμβανε και ανακλούσε ακτινοβολία στη διεύθυνση του ναδύρ (Καρτάλης, 2006).

Η χωρική διακριτική ικανότητα ενός συστήματος Ραντάρ εξαρτάται από το μήκος του ορθογώνιου παλμού (pulse length), το οποίο ορίζεται ως το διάστημα που διανύει το σήμα του Ραντάρ κατά τη χρονική διάρκεια ενός παλμού. Επιπλέον, η χωρική διακριτική ικανότητα χωρίζεται σε δύο, εκείνη της διεύθυνσης των αποστάσεων (range or across-track resolution) και της διεύθυνσης του αζιμούθιου (azimuth or along-track resolution), οι οποίες αναφέρονται σε κάθετη και παράλληλη αντίστοιχα διεύθυνση ως προς την διεύθυνση κίνησης του δορυφόρου (Καρτάλης, 2006).

Η χωρική διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση του αζιμούθιου ενός συστήματος Ραντάρ είναι ανάλογη με το μήκος κύματος και με την απόσταση των κεκλιμένων αποστάσεων, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη στην διεύθυνση της κίνησης του δορυφόρου. Στην ουσία η διακριτική ικανότητα καθορίζεται από το φυσικό μήκος της κεραίας. Θεωρώντας ότι η κεραία δεν μπορεί να είναι αρκετά μεγάλου μήκους, κατά συνέπεια η διακριτική ικανότητα στο αζιμούθιο είναι πολύ μικρή (Μερτίκας, 1999).

Στην πραγματικότητα όμως, εξαιτίας ταλαντώσεων της κεραίας η διακριτική ικανότητα είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από το μισό του μήκους της κεραίας. Μεγαλύτερο μήκος κεραίας ή μικρότερο μήκος κύματος αυξάνουν την διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση του αζιμούθιου (ESA, 2007).

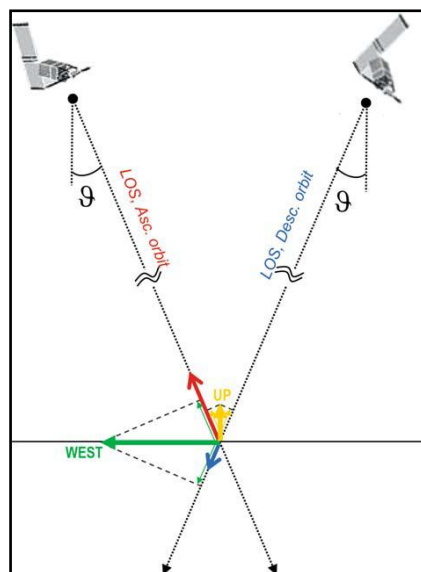
Η χωρική διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των αποστάσεων καθορίζεται από το φυσικό μήκος του παλμού (χρονική διάρκεια). Δύο στόχοι που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης θα διαχωρίζονται αν η εγκάρσια απόστασή τους είναι μεγαλύτερη από το μισό του μήκους κύματος του παλμού έτσι ώστε τα οπισθοσκεδαζόμενα σήματά τους φθάσουν στον δορυφόρο σε διαφορετικούς χρόνους. Για να επιτευχθεί αυτό, θα πρέπει τα δύο αντικείμενα να απέχουν απόσταση μεγαλύτερη από το μισό μήκος κύματος του παλμού ($\lambda/2$) στη διεύθυνση των κεκλιμένων αποστάσεων (Μερτίκας, 1999).



Εικόνα 1.3: Διαχωριστική ικανότητα στην διεύθυνση των αποστάσεων και στην διεύθυνση του αζιμούθιου (Μερτίκας, 1999).

Ανιούσα και κατιούσα τροχιά δορυφόρων

Η παρατήρηση της επιφάνειας ολόκληρης της Γης είναι εφικτή με τον συνδυασμό της τροχιακής δορυφορικής κίνησης κατά μήκος των παραλλήλων (σχεδόν πολική τροχιά), και της περιστροφής της Γης στο επίπεδο του ισημερινού. Αυτή η δυνατότητα προέρχεται από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της τροχιάς του δορυφόρου από το Νότο προς το Βορρά (ανιούσα τροχιά) και από τον Βορρά προς τον Νότο (κατιούσα τροχιά), η κεραία SAR είναι στραμμένη στην ίδια πλευρά του τροχιακού επιπέδου, σε συμφωνία με το διάνυσμα της ταχύτητας (π.χ. η κεραία του ραντάρ είναι πάντα στη δεξιά πλευρά του ίχνους). Κατ' αυτό τον τρόπο, η ίδια περιοχή στο έδαφος, παρατηρείται από την κεραία SAR από τα ανατολικά κατά την κατιούσα τροχιά, και από τα δυτικά κατά τη διάρκεια της ανιούσας τροχιάς (ESA, 2007).



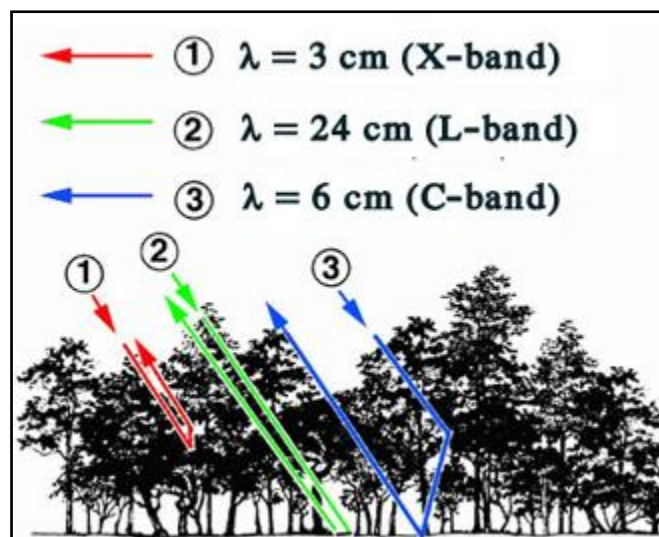
Εικόνα 1.4: Ανιούσα (ascending) και κατιούσα (descending) τροχιά του δορυφόρου και οι συνιστώσες της παραμόρφωσης (Guzzetti et al., 2009)

1.3.3 Χαρακτηριστικά SAR απεικονίσεων

Όπως οποιοδήποτε ραδιοηλεκτρικό σήμα, η ακτινοβολία που επιστρέφει από το έδαφος στον ανιχνευτή έχει μια τιμή φάσης και κάποιο πλάτος. Το σύστημα SAR καταγράφει και τα δύο, παρέχοντας έτσι δεδομένα με την μορφή μιγαδικών αριθμών. Μετά την σύνθεση, για την παραγωγή της εικόνας SAR, η εικόνα εξακολουθεί να περιέχει τιμές πλάτους και φάσης για κάθε ξεχωριστό σημείο του εδάφους.

Το πλάτος (amplitude) αντιστοιχεί στην ένταση της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας και εξαρτάται από τις ιδιότητες της πηγής αλλά και από τις ιδιότητες του στόχου. Στη γήινη επιφάνεια, η ενέργεια του παλμού του ραντάρ διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις, και μέρος της ανακλάται προς την αντένα του ραντάρ. Αυτή η οπισθοδιασπορά προκαλεί την επιστροφή στην κεραία μιας πιο αδύνατης ηχούς ραντάρ που λαμβάνεται από την κεραία σε μια συγκεκριμένη πόλωση.

Οι ιδιότητες της πηγής της ακτινοβολίας ραντάρ είναι αρχικά το μήκος κύματος λ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, η πόλωση του σήματος και η γωνία πρόσπτωσης. Σήματα ραντάρ σε συχνότητες με διαφορετικά μήκη κύματος είναι χρήσιμα για διαφορετικές εφαρμογές. Για παράδειγμα, σήματα ραντάρ στις συχνότητες X-band (δηλαδή με μικρό μήκος κύματος, $\lambda=3$ cm) ανακλώνται από τα φυλλώματα στις κορυφές δέντρων. Αντίθετα, σήματα ραντάρ στις συχνότητες L-band (δηλαδή με μεγάλο μήκος κύματος, $\lambda=24$ cm) διαπερνούν τα φυλλώματα των δέντρων και ανακλώνται από το έδαφος. Σήματα ραντάρ στις ενδιάμεσες συχνότητες C-band (δηλαδή με μήκος κύματος, $\lambda=6$ cm) συνήθως δημιουργούν πολλαπλές οπισθοσκεδάσεις κατά τη διέλευση τους μέσα από τα φυλλώματα των δέντρων (ESA, 2007, Δεληκάρου, 2015).



Εικόνα 1.5: Ικανότητα διείσδυσης των καναλιών X, L και C (Δεληκάρου, 2015).

Όσον αφορά την πόλωση, μερικά συστήματα SAR εκπέμπουν και λαμβάνουν σήματα με οριζόντια (H) ή κάθετη (V) πόλωση σε διάφορους συνδυασμούς: HH, VV, HV, VH. Τέλος, σχετικά με την γωνία πρόπτωσης, όσο μικρότερες είναι οι γωνίες τόσο μεγαλύτερη είναι η οπισθοσκέδαση που προκαλείται (Μερτίκας, 1999).

Οι ιδιότητες των στόχων εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα του εδάφους), από τις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών (π.χ. υγρασία), και από το συντονισμό της ακτινοβολίας.

Η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζει σημαντικά την ένταση του σήματος επιστροφής. Συνήθως, οι βράχοι και οι αστικές περιοχές προκαλούν μεγάλη διάχυση της ακτινοβολίας, έτσι ώστε να ανιχνεύεται μεγαλύτερη ένταση του σήματος επιστροφής. Οι λείες επιφάνειες (θάλασσα, λίμνες κλπ) αποτελούν ισχυρούς ανακλαστές σε διευθύνσεις κάθετες από τη διεύθυνση πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα το σήμα επιστροφής να είναι ασθενές. Οι πιο αποτελεσματικοί ανακλαστήρες είναι αυτοί που δημιουργούν διπλή ανάκλαση όπως ένα ζευγάρι καθρεπτών υπό κάθετη γωνία. Τέτοιες δομές είναι συνήθως τεχνητές, όπως οι πολυκατοικίες και τα πεζούλια των πεζοδρομίων στις αστικές περιοχές (Μερτίκας, 1999).

Η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την επιφάνεια του στόχου, εξαρτάται από την διηλεκτρική σταθερά του. Καθώς αυξάνεται η διηλεκτρική σταθερά, αυξάνει και η ανακλαστικότητα της επιφάνειας. Η αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς είναι ανάλογη της αύξησης της περιεκτικότητας, εδαφών και πετρωμάτων, σε υγρασία. Εδάφη με μεγάλο ποσοστό υγρασίας, εμφανίζονται φωτεινότερα στις εικόνες ραντάρ σε σχέση με τα ξηρά εδάφη. Όταν κάποια σώματα έχουν μικρή διηλεκτρική σταθερά, αυξάνεται η διείσδυση της μικροκυματικής ακτινοβολίας στο εσωτερικό τους, διότι ανακλούν λιγότερη ενέργεια από ότι αν είχαν μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά. Το βάθος διείσδυσης βέβαια, εξαρτάται και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (Μερτίκας, 1999).

Στίγματα (speckles)

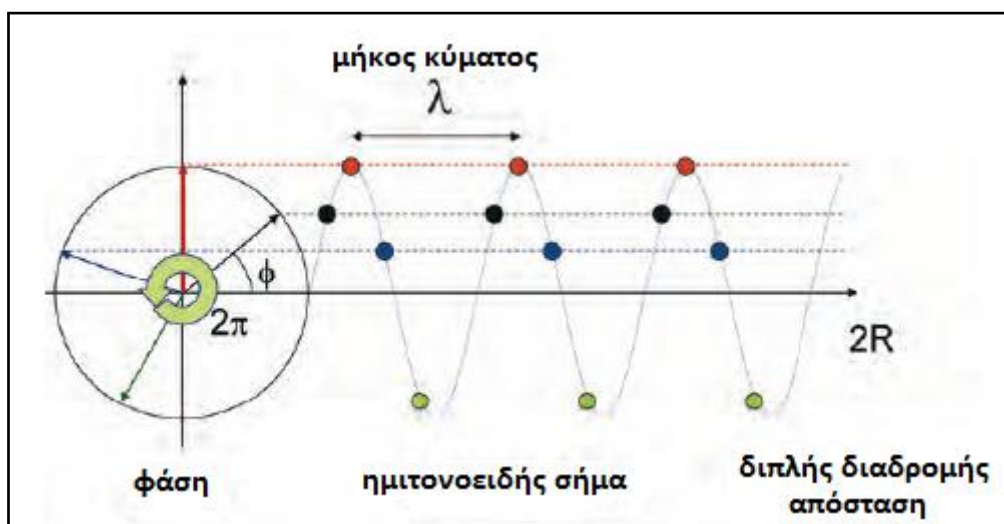
Η παρουσία πολλαπλών ανακλαστών εντός του ίδιου εικονοστοιχείου στο έδαφος δημιουργεί το φαινόμενο των στιγμάτων που είναι κοινό για όλα τα εικονοληπτικά συστήματα ραντάρ.

Αυτό το φαινόμενο των στιγμάτων είναι συνέπεια της συμβολής, άλλοτε θετικής και άλλοτε αρνητικής, των ανακλώμενων σημάτων από πολλούς μικρούς στοιχειώδεις ανακλαστές (με διαστάσεις ανάλογες του μήκους κύματος της ακτινοβολίας του Radar) εντός ενός εικονοστοιχείου. Αυτά τα σήματα, τα οποία έχουν τυχαία φάση εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων μεταξύ των αντικειμένων, προστίθενται στην απευθείας ανακλώμενη ακτινοβολία (Μερτίκας, 1999, ESA, 2007).

Τα στίγματα επηρεάζουν την ποιότητα και τη χρησιμότητα της εικόνας SAR. Οι εικόνες εμφανίζουν συχνά το φαινόμενο των στιγμάτων. Όμως, πραγματοποιώντας περισσότερες λήψεις της ίδιας περιοχής από ελαφρώς διαφορετικές οπτικές γωνίες, τα στίγματα περιορίζονται σημαντικά διότι ακυρώνονται οι τυχαίες τιμές. Επίσης, η εφαρμογή φίλτρων στην εικόνα μπορεί να διορθώσει το φαινόμενο των στιγμάτων, σε βάρος όμως της χωρικής ανάλυσης (ESA, 2007).

Η φάση (phase) καθορίζεται από δύο παράγοντες: α) από την λεγόμενη εσωτερική συμβολή (internal contribution) που εξαρτάται από την φύση του υλικού του εδάφους και τον τρόπο που αυτό μεταβάλλει την φάση λόγω ποικίλων φυσικοχημικών ιδιοτήτων του και β) από την διπλή διαδρομή που κάνει η ακτινοβολία μεταξύ του radar και του εδάφους (two-way path contribution). Η περιοχή του εδάφους που αντιπροσωπεύεται από ένα κελί στην εικόνα γενικά εμπεριέχει εκατοντάδες στοιχειώδεις στόχους, ο καθένας από τους οποίους συμβάλει διαφορετικά στην διαμόρφωση της τελικής τιμής φάσης και πλάτους του εν λόγω κελιού (ESA, 2007).

Παράλληλα, οι σχετικές θέσεις των στοιχειωδών στόχων προκαλούν μια μετατόπιση στην φάση (phase shift) καθώς η ακτινοβολία προσπίπτει σε αυτούς με διαφορετικούς χρόνους, από ότι στο κέντρο της ψηφίδας. Εφόσον το μήκος κύματος είναι πολύ μικρότερο από το μέγεθος της κελιού, η μετατόπιση αυτή μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή. Ως αποτέλεσμα, η εσωτερική συμβολή, η οποία είναι αποτέλεσμα της συμβολής στόχων και επομένως εκατοντάδων μιγαδικών αριθμών, είναι εντελώς τυχαία. Εν αντιθέσει, η συμβολή λόγω της διπλής διαδρομής της ακτινοβολίας, είναι προσδιορίσιμη και είναι η μόνη που μπορεί να μετρηθεί και να αξιοποιηθεί με την μέθοδο της συμβολομετρίας (ESA, 2007).



Εικόνα 1.6: Η ημιτονοειδής συνάρτηση του σήματος με περίοδο 2π (ESA, 2007).

1.3.4 Παραμορφώσεις στις εικόνες SAR

Τα συστήματα SAR ουσιαστικά μετρούν την απόσταση μεταξύ του αισθητήρα ραντάρ και των σημείων των επιμέρους σκεδαστών (στόχων) στην περιοχή που απεικονίζεται. Η εν λόγω απόσταση μπορεί να μετατραπεί σε απόσταση επί του εδάφους χρησιμοποιώντας απλούς μετασχηματισμούς. Ωστόσο, η μορφολογία του εδάφους της απεικονιζόμενης περιοχής προκαλεί μια σειρά από γεωμετρικές παραμορφώσεις στις δημιουργούμενες εικόνες SAR. Τα σφάλματα των εν λόγω παραμορφώσεων εξ αιτίας της γεωμετρίας λήψης των εικόνων διακρίνονται στις παρακάτω τρεις κύριες κατηγορίες, όπως αναφέρει ο Μερτίκας (1999):

1. **Σμίκρυνση (Foreshortening)** – Η εκάστοτε ανύψωση του εδάφους σε ένα συγκεκριμένο σημείο ελαττώνει την απόσταση του εν λόγω σημείου από τον αισθητήρα ραντάρ. Σαν άμεσο αποτέλεσμα, εδάφη που έχουν κλίσεις προσανατολισμένες προς το ραντάρ εμφανίζονται “συμπιεσμένα” σε σχέση με εδάφη που είναι προσανατολισμένα στην αντίθετη προς το ραντάρ κατεύθυνση.

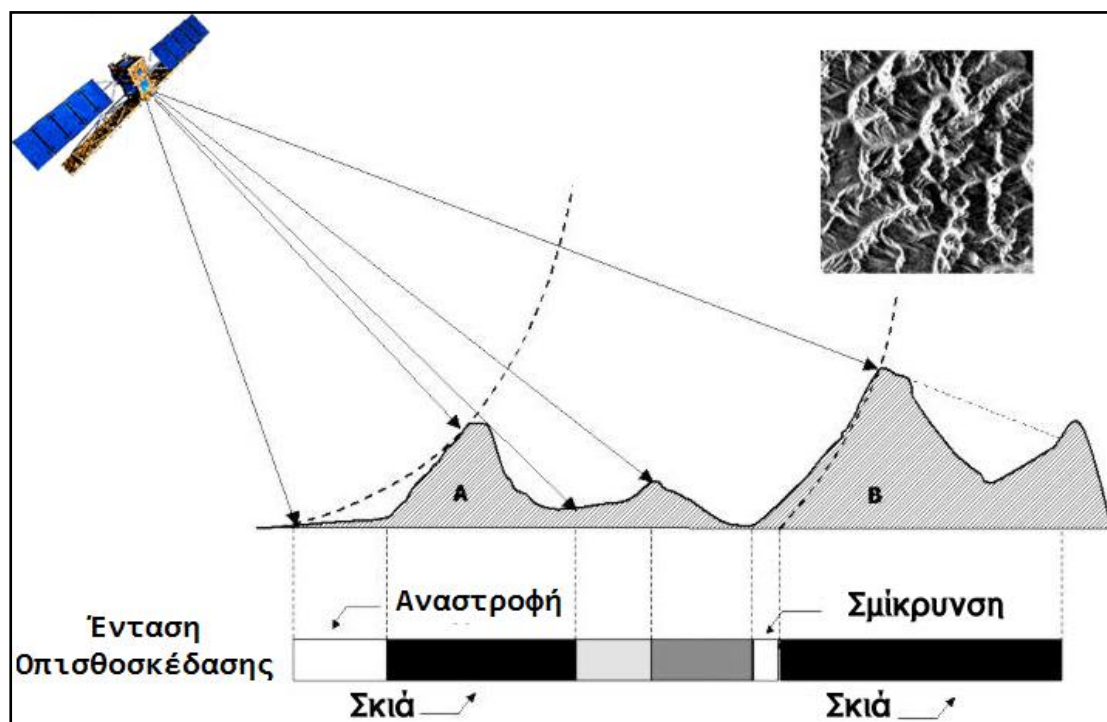
Στην πρώτη περίπτωση τα παραμορφωμένα εδάφη με έμπροσθεν κλίση εμφανίζονται στις εικόνες SAR φωτεινότερα σε σχέση με τα γειτονικά τους εδάφη, δεδομένου ότι η ανακλώμενη ενέργεια του ραντάρ από το κεκλιμένο προς τα έμπροσθεν έδαφος “συμπιέζεται” έτσι ώστε στην εικόνα χρησιμοποιούνται λιγότερα εικονοστοιχεία για την απεικόνιση των εν λόγω εδαφών. Κατ’ αναλογία, εδάφη με όπισθεν κλίσεις εμφανίζονται “τεντωμένα” και με σκοτεινότερους τόνους σε σχέση με τα γειτονικά τους εδάφη, δεδομένου ότι η ανακλώμενη ενέργεια του ραντάρ από το προς τα όπισθεν κεκλιμένο έδαφος “εξαπλώνεται” έτσι ώστε στην εικόνα χρησιμοποιούνται περισσότερα εικονοστοιχεία για την απεικόνιση των εν λόγω εδαφών.

2. **Αναστροφή (Layover)** – Όταν η έμπροσθεν κλίση του εδάφους είναι μεγαλύτερη από τη γωνία όρασης του ραντάρ, το ανώτερο μέρος του κεκλιμένου εδάφους είναι πλησιέστερα στο ραντάρ, από ότι το κατώτερο μέρος του κεκλιμένου εδάφους. Σαν αποτέλεσμα, δημιουργείται μια παραμόρφωση που είναι μια ακραία περίπτωση σμίκρυνσης, η οποία προκαλεί το κεκλιμένο έδαφος να απεικονίζεται “αναδιπλωμένο”.

3. **Σκιά (Shadowing)**– Όταν η όπισθεν κλίση του εδάφους είναι μεγαλύτερη από τη γωνία όρασης του ραντάρ, το κεκλιμένο έδαφος δεν απεικονίζεται στην εικόνα δεδομένου ότι καλύπτεται από τη σκιά που δημιουργείται από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία.

Κατά κανόνα, για εδάφη με υψηλές κλίσεις, μεγάλες γωνίες όρασης δημιουργούν σημαντικές παραμορφώσεις πτύχωσης, ενώ μικρές γωνίες όρασης του ραντάρ δημιουργούν σημαντικές παραμορφώσεις σκιάς. Η πρώτη περίπτωση είναι ιδιαίτερα έντονη σε εικόνες από αερομεταφερόμενα ραντάρ, τα οποία λειτουργούν με μεγάλες γωνίες όρασης. Στην περίπτωση δορυφορικών ραντάρ, συνήθως τέτοιες παραμορφώσεις παρατηρούνται μόνο όταν η όπισθεν κλίσεις ξεπερνούν τις 70° περίπου. Πρέπει να σημειωθεί ότι εάν είναι διαθέσιμο ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους

της απεικονιζόμενης περιοχής, οι εικόνες SAR μπορούν να διορθωθούν από τις παραπάνω παραμορφώσεις με μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία που είναι ανάλογη της γνωστής ορθοαναγωγής συμβατικών εικόνων ή αεροφωτογραφιών.



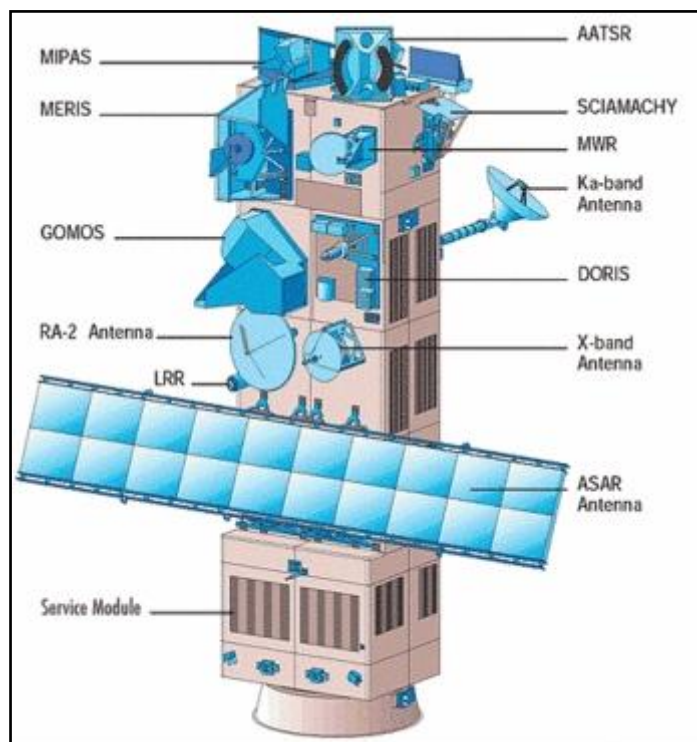
Εικόνα 1.7: Γεωμετρικές παραμορφώσεις εικόνων SAR (Δεληκαράογλου, 2015)

1.3.5 Δορυφόρος ENVISAT

Ο ENVISAT είναι ένας δορυφόρος πολικής τροχιάς και αποτελεί τον διάδοχο των δορυφόρων ERS. Εκτοξεύτηκε το Μάρτιο του 2002, ενώ η αποστολή του ολοκληρώθηκε στις 8 Απριλίου 2012. Μετέφερε 10 όργανα, ενώ το βάρος του ήταν 8 τόνοι, αποτελώντας έτσι τη μεγαλύτερη μη στρατιωτική αποστολή για την παρατήρηση της Γης. Πετάει με πολική τροχιά, σύγχρονη με τον ήλιο, σε περίπου 800 χιλιόμετρα υψόμετρο. Ο επαναλαμβανόμενος κύκλος της τροχιάς αναφοράς είναι 35 ημέρες, και για τους περισσότερους αισθητήρες, που διαθέτουν μεγάλη λωρίδα, παρέχει πλήρη κάλυψη του πλανήτη μέσα σε μία έως τρεις ημέρες.

Επίσης, διαθέτει περισσότερο εξελιγμένα συστήματα απεικόνισης, ραντάρ για τη μέτρηση του υψομέτρου και της θερμοκρασίας. Στα παραπάνω μέσα προστίθεται ένα φασματομέτρο μεσαίας ανάλυσης, το οποίο είναι ευαίσθητο στα χρώματα της Γης και των ωκεανών. Ακόμη, ο ENVISAT είναι εξοπλισμένος με δύο ατμοσφαιρικούς αισθητήρες παρακολούθησης αερίων (ίχνη αερίων). Οι βελτιώσεις κατέστησαν δυνατή τη ρύθμιση της γωνίας ανύψωσης της δέσμης ραντάρ και την επιλογή διαφόρων ζωνών σάρωσης πλάτους 100 ή 400 km.

Παρέχει μετρήσεις για την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς αλλά και για τους πάγους. Επιπροσθέτως, επιτρέπει την παρακολούθηση της εξέλιξης των περιβαλλοντικών και κλιματικών αλλαγών, ενώ τα δεδομένα που παρέχει διευκολύνουν την ανάπτυξη των επιχειρησιακών και εμπορικών εφαρμογών. Η αποστολή του ENVISAT έληξε στις 8 Απριλίου του 2012, μετά την απροσδόκητη απώλεια επαφής με το δορυφόρο.



Εικόνα 1.8: Ο δορυφόρος ENVISAT και τα επιμέρους όργανα που μεταφέρει (ESA, 2007).

Πίνακας 1.2: Χαρακτηριστικά δορυφόρου ENVISAT (ESA, 2007).

Χαρακτηριστικά ENVISAT	
Έτος κατασκευής	2002
Μέσο ύψος τροχιάς (km)	800
Επαναληπτικότητα	35
Αισθητήρας	ASAR
Φασματικό κανάλι	C
Συχνότητα (GHz)	5.331
Μήκος κύματος (cm)	5.7
Γωνία Παρατήρησης	15.0 - 45.2
Πόλωση	HH, VV, HV, VH
Πλάτος λωρίδας κάλυψης (Km)	100 - 485
Διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση των Αποστάσεων (m)	7.8
Διακριτική ικανότητα στη διεύθυνση του Αζιμούθιου (m)	4.04

Τα δύο κυριότερα όργανα που διαθέτει ο δορυφόρος ENVISAT είναι τα ακόλουθα:

ASAR: Είναι ένα Εξελιγμένο Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Advanced Synthetic Aperture Radar) και εξασφαλίζει την συνέχεια από το ραντάρ SAR και τον αισθητήρα AMI των δορυφόρων ERS 1 και ERS 2.

MERIS: Όντας ίσως το πιο σημαντικό όργανο του ENVISAT, το MERIS έχει την δυνατότητα να προγραμματιστεί τόσο ως προς το εύρος των μηκών κύματος των δέκα πέντε φασματικών καναλιών μέσης φασματικής διακριτικής ικανότητας, όσο και στην τοποθέτησή τους στα μήκη κυμάτων με φασματικό εύρος από 390 nm έως 1040 nm.

1.4 Συμβολομετρία Συστημάτων Εικονοληπτικών SAR

Τα τελευταία 20 χρόνια η συμβολομετρία Ραντάρ αναπτύχθηκε ως ένα από τα πλέον σημαντικά εργαλεία της Τηλεπισκόπησης, καθώς χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τον ακριβή υπολογισμό και την καταγραφή της παραμόρφωσης του εδάφους (Ferretti et al., 2000, Berardino et al., 2002, Colesanti et al., 2003a, Delacurt et al., 2007). Προέκυψε από την ανάπτυξη των συστημάτων SAR και είναι γνωστή ως InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Η παραμόρφωση του εδάφους οφείλεται τόσο σε φυσικά φαινόμενα, γεωλογικά και γεωφυσικά, όπως σεισμικά γεγονότα, καθίζηση, κατολισθήσεις και ηφαιστειακές εκρήξεις, όσο και σε ανθρωπογενή αίτια που σχετίζονται με γεωτρήσεις υδάτων και πετρελαίου, μεταλλεία κτλ. Επίσης, βασική εφαρμογή της συμβολομετρίας Ραντάρ είναι η παραγωγή μεγάλης ακρίβειας ψηφιακών μοντέλων ανάγλυφου (DEM).

Η συμβολομετρία διακρίνεται σε διάφορα είδη τα οποία εξαρτώνται από την διάταξη των κεραιών και της μεθόδου λήψης των απεικονίσεων, την (α) κατά πλάτος συμβολομετρία (across-track interferometry), (β) την κατά μήκος συμβολομετρία (along-track interferometry), (γ) την επαναληπτική συμβολομετρία και τέλος την (δ) διαφορική συμβολομετρία (differential interferometry).

Η συμβολομετρία Ραντάρ (InSAR) είναι η τεχνική η οποία εξάγει πληροφορία που σχετίζεται με την τοπογραφία της Γης (ESA, 2007). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο λήψεων εικόνων Ραντάρ οι οποίες έχουν αποκτηθεί από ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο χώρο ή στο χρόνο. Οι πρώτες μελέτες που αφορούν στη συμβολομετρία εστίαζαν στην εξαγωγή της τοπογραφίας, παρουσιάζοντας την δυνατότητα της συμβολομετρίας InSAR στην παραγωγή υψηλής ανάλυσης ψηφιακών μοντέλων ανάγλυφου (DEM) (Ferretti et al., 1997).

Μαθηματικά, οι εικόνες SAR μπορούν να εκφραστούν ως ένα σύνολο μιγαδικών αριθμών για κάθε κελί στο έδαφος (ESA, 2007):

$$P = A e^{j(\varphi_{int} + \varphi_{path})}$$

όπου:

P : ο μιγαδικός αριθμός ενός εικονοστοιχείου

A : το πλάτος της επιστρεφόμενης ακτινοβολίας

φ_{int} : η φάση λόγω εσωτερικής συμβολής του στόχου

φ_{path} : η φάση λόγω διπλής διαδρομής της ακτινοβολίας

Για κάθε εικονοστοιχείο καταγράφονται δύο ειδών τιμές. Η μία αφορά το πλάτος του οπισθοσκεδαζόμενου σήματος, το οποίο εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας που επιστρέφει στο RADAR μετά από την αλληλεπίδρασή της με τον στόχο και αντιστοιχεί στο μέσο όρο του πλάτους στις SAR απεικονίσεις. Η δεύτερη αφορά τη διαφορά φάσης του σήματος μεταξύ των δύο λήψεων και κυμαίνεται μεταξύ 0 και 2π rad (εκφράζεται στο διάστημα $[-\pi, \pi)$). Η τεχνική της δορυφορικής συμβολομετρίας InSAR και της διαφορικής δορυφορικής συμβολομετρίας DInSAR (Differential InSAR) εκμεταλλεύεται αυτό το πλεονέκτημα της καταγραφής του σήματος επιστροφής με τη μορφή μιγαδικών αριθμών (ένταση και φάση).

Για να εφαρμοστεί η τεχνική της συμβολομετρίας, πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο εικόνες του ίδιου στόχου. Ένας δορυφόρος SAR μπορεί να παρατηρήσει την ίδια περιοχή από ελαφρώς διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αυτό δύναται να γίνει είτε την ίδια χρονική στιγμή, με δύο radar προσαρμοσμένα πάνω στην πλατφόρμα του δορυφόρου, ή σε διαφορετικές στιγμές, εκμεταλλευόμενοι τις επαναλαμβανόμενες τροχιές του ίδιου δορυφόρου. Γι' αυτούς τους δορυφόρους, η περίοδος μεταξύ των λήψεων είναι 35 ή ένα πολλαπλάσιο του 35 σε μέρες (ESA, 2007). Στους σύγχρονους δορυφόρους είναι πιο μικρό το διάστημα της δειγματοληψίας.

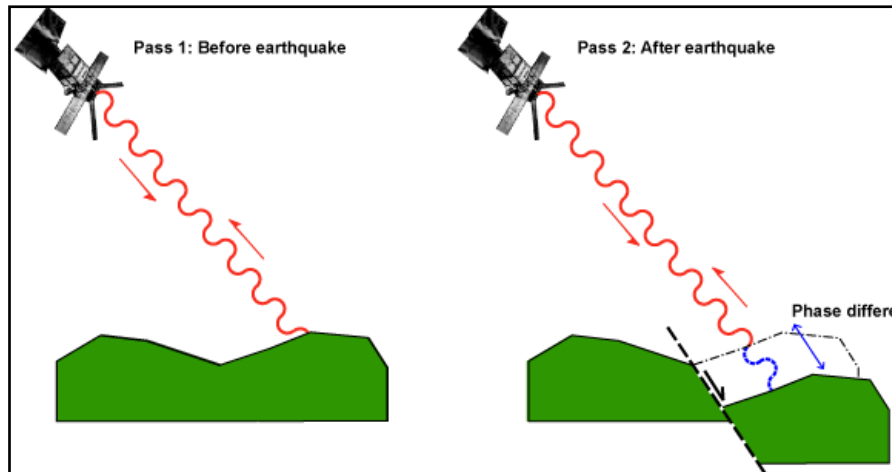
Η φάση του σήματος επιστροφής μπορεί να εκφραστεί ως ακτίνια όπως φαίνεται παρακάτω (Μετρίκας, 1999). :

$$\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda} 2r + \varphi_{\text{Scattering}} + \varphi_{\text{delay}}$$

όπου, r : η απόσταση δορυφόρου – δέκτη στην διεύθυνση LOS, $\varphi_{\text{Scattering}} + \varphi_{\text{delay}}$: οι καθυστερήσεις φάσης λόγω οπισθοσκέδασης και ατμοσφαιρικής επίδρασης.

Το αρνητικό πρόσημο της παραπάνω εξίσωσης οφείλεται στην καθυστέρηση της φάσης του σήματος επιστροφής. Ωστόσο, οι δύο καθυστερήσεις της φάσης που οφείλονται στην οπισθοσκέδαση και την ατμόσφαιρα μπορούν να παραλειφθούν με την προϋπόθεση ότι δεν έχουν μεταβληθεί τα χαρακτηριστικά της σκέδασης των ανακλαστήρων και ότι επικρατούν παρόμοιες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οπότε η διαφορά φάσης εκφράζεται ως εξής (Μετρίκας, 1999):

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) = -\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$$



Εικόνα 1.9: Διαφορά φάσης εξαιτίας παραμόρφωσης του εδάφους (Piyush, 2003).

Το διάγραμμα κροσσών συμβολής ή συμβολογράφημα (interferogram) προκύπτει από τον μιγαδικό πολλαπλασιασμό δύο SAR απεικονίσεων (GAMMA Documentation, 2006):

$$Y = P_1 \cdot P_2 = A_1 \cdot A_2 \cdot e^{-j(\phi_2 - \phi_1)}$$

Ο μιγαδικός πολλαπλασιασμό της μίας απεικόνισης με τον συζυγή μιγαδικό της άλλης, προϋποθέτει την ακριβή επικάλυψη μεταξύ των απεικονίσεων, τόσο σε χωρικό, όσο και σε φασματικό επίπεδο.

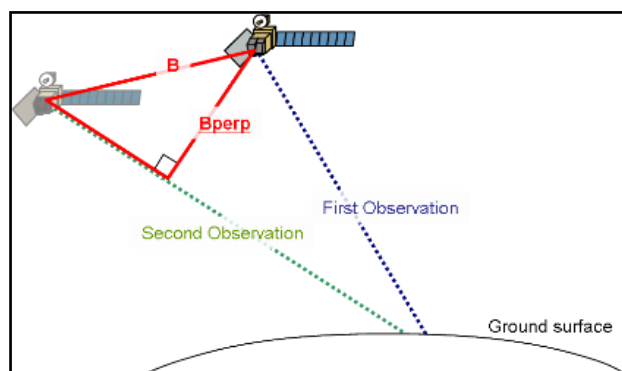
Καθώς η τιμή της συμβολομετρικής φάσης κυμαίνεται στο διάστημα $[-\pi, \pi)$, το συμβολογράφημα χαρακτηρίζεται από την παρουσία επαναλαμβανόμενων ισοφασικών κροσσών συμβολής. Κάθε κροσσός εκφράζει διαφορά φάσης ενός πλήρους κύκλου ($\phi = 2\pi$), που αντιστοιχεί σε μεταβολή της απόστασης δορυφόρου-στόχου ίσης προς το μισό του μήκους κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ($\Delta r = \lambda / 2$). Στην περίπτωση του ENVISAT κάθε κροσσός αντιστοιχεί σε μεταβολή 2,8 cm ($\lambda = 5,6$ cm) κατά μήκος της διεύθυνσης LOS (ESA, 2007).

1.4.1 Άνυσμα Βάσης (Baseline)

Βασικό χαρακτηριστικό της Συμβολομετρίας SAR είναι η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων (ή τροχιών) που παρατηρούν την ίδια περιοχή μελέτης από δύο ελαφρώς διαφορετικές θέσεις στο διάστημα και ονομάζεται συμβολομετρικό άνυσμα βάσης (B) (interferometer baseline). Το άνυσμα βάσης αναφέρεται τόσο στην γεωμετρική απόσταση των δύο δορυφόρων, αλλά και στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των λήψεων. Στην δεύτερη περίπτωση το άνυσμα ονομάζεται χρονικό άνυσμα βάσης (ESA, 2007).

Το άνυσμα βάσης είναι μια βασική παράμετρος της συμβολομετρικής γεωμετρίας το οποίο αναλύεται στην συνιστώσα παράλληλα στη διεύθυνση των αποστάσεων της απεικόνισης συνιστώσα (parallel baseline - B_n) και στην εγκάρσια

συνιστώσα (perpendicular baseline - B_p). Πολύ βασικό και σημαντικό ρόλο στην καταλληλότητα ενός ζεύγους SAR απεικονίσεων διαδραματίζει η εγκάρσια συνιστώσα του ανύσματος βάσης (ESA, 2007).



Εικόνα 1.10: Κάθετο άνυσμα βάσης (perpendicular baseline) μεταξύ των δύο δορυφόρων (Piyush, 2003).

1.4.2 Υψόμετρο Αμφισημίας (Altitude of ambiguity)

Η εγκάρσια συνιστώσα του ανύσματος βάσης καθορίζει την ασάφεια υψομέτρου ή διαφορετικά το υψόμετρο αμφισημίας. Το υψόμετρο αμφισημίας (ha) ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά που μπορεί να επιφέρει μία αλλαγή στην συμβολομετρική φάση ενός πλήρους κύκλου (2π). Το υψόμετρο αμφισημίας είναι αντιστρόφως ανάλογο με το κάθετο άνυσμα βάσης. Η ασάφεια υψομέτρου δηλαδή, αναφέρεται στην μέγιστη διαφορά υψομέτρου που μπορεί να εντοπίσει μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων ενός συμβολογραφήματος (ESA, 2007).

Γενικά, ισχύει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το άνυσμα βάσης, τόσο πιο ακριβής είναι η μέτρηση του υψομέτρου. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιηθεί ένα κάθετο άνυσμα βάσης 100m, μία διαφορά συμβολομετρικής φάσης 2π αντιστοιχεί σε μία υψομετρική διαφορά περίπου 93m. Εντούτοις, υπάρχει ένα ανώτερο όριο στις τιμές που μπορεί να πάρει το κάθετο άνυσμα βάσης, πάνω από το οποίο τα συμβολομετρικά σήματα δε συσχετίζονται και δε μπορεί να παραχθεί ένας κροσσός συμβολής.

Συμβολογραφήματα με κάθετο άνυσμα βάσης μεγαλύτερο του μηδενός περιλαμβάνουν κροσσούς συμβολής που οφείλονται στην τοπογραφία, με ισοδιάσταση ίση με το υψόμετρο αμφισημίας. Στην περίπτωση της διαφορικής συμβολομετρίας, όπου η φάση λόγω τοπογραφίας απομακρύνεται, το υψόμετρο αμφισημίας εκφράζει το σφάλμα υψομέτρου, και εμφανίζεται σαν ένας πλήρης κροσσός στο συμβολογράφημα.

Συμπερασματικά υπάρχει ένα βέλτιστο άνυσμα βάσης, το οποίο μεγιστοποιεί το ποσοστό του σήματος προς το θόρυβο. Στην περίπτωση του ERS και ENVISAT αυτό το βέλτιστο άνυσμα βάσης είναι περίπου στα 300-400 m. (ESA, 2007)

1.4.3 Συνάφεια (Coherence)

Το συμβολογράφημα, ωστόσο, δύναται να περιέχει «θόρυβο» από διάφορους παράγοντες, που αναλύονται παρακάτω. Η εκτίμηση του περιεχόμενου θορύβου και κατά συνέπεια η αξιοπιστία του συμβολογραφήματος μπορεί να υπολογιστεί για ένα ζευγάρι εικόνων SAR από το μέγεθος της τοπικής συνάφειας γ (coherence). Μαθηματικά εκφράζεται ως εξής (ESA, 2007, Rocca, 2015):

$$\gamma = \frac{E\{P_1 P_2\}}{\sqrt{E\{A_1^2\} \cdot E\{A_2^2\}}}$$

Η τοπική συνάφεια είναι ο συντελεστής συσχέτισης του ζεύγους των εικόνων SAR υπολογισμένου σε ένα μικρό χωρικό παράθυρο εύρους μερικών εικονοστοιχείων, όταν όλα τα επιμέρους στοιχεία της φάσης, κυρίως λόγω κλίσης του εδάφους, έχουν εκτιμηθεί. Τα στοιχεία της φάσης σε τόσο μικρό χωρικό παράθυρο, είναι σε πρώτη προσέγγιση γραμμικά, τόσο προς την διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου όσο και κάθετα σε αυτήν. Συνεπώς, μπορούν να υπολογιστούν από το ίδιο το συμβολογράφημα με μεθόδους ανίχνευσης συχνότητας σύνθετων ημιτονοειδών θορύβου (πχ Fast Fourier Transform) ή με την Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation) (ESA, 2007).

Οι τιμές της συνάφειας κυμαίνονται από 0, όταν η συμβολομετρική φάση οφείλεται μόνο σε θόρυβο (πλήρης αποσυσχέτιση), μέχρι 1 στην περίπτωση πολύ καλής συσχέτισης των ιδιοτήτων του στόχου μεταξύ δύο λήψεων (απόλυτη ταύτιση του φάσματος). Ο χάρτης συνάφειας είναι ουσιαστικά το κριτήριο για το μέγεθος στο οποίο έχουν μεταβληθεί οι ιδιότητες των στόχων στο διάστημα μεταξύ των δύο λήψεων.

Για τα SLC δεδομένα των δορυφόρων ERS και NVISAT της ESA, με χωρική ανάλυση 4x20m στην διεύθυνση του αζιμουθίου και την διεύθυνση των αποστάσεων αντίστοιχα, επιλέγονται συνήθως παράθυρα διαστάσεων 2x10 ή 3x15 με σκοπό τα τελικά εικονοστοιχεία να είναι τετράγωνα (ESA, 2007).

Στα σημεία που η συνάφεια παίρνει πολύ μικρές τιμές, μπορούν να εφαρμοστούν φίλτρα τα οποία εξομαλύνουν τον θόρυβο και βελτιώνουν την εικόνα του συμβολογραφήματος. Η συνάφεια σχετίζεται με τον λόγο σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio – SNR).

1.4.4 Παράγοντες αποσυσχέτισης συμβολομετρικής φάσης.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το συμβολογραφήμα δύναται να περιέχει σημαντικό ποσοστό θορύβου, ο οποίος οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Η ύπαρξη του θορύβου αυξάνει την αποσυσχέτιση μεταξύ των εικόνων και μειώνει την αποτελεσματικότητα του συμβολογραφήματος. Γι' αυτόν τον λόγο πρέπει αφ ενός να αναγνωριστούν επ' ακριβώς τα είδη θορύβου που εμπεριέχονται στο σήμα και αφ'

ετέρου να απομακρυνθούν, ώστε να βελτιωθεί η αξιοπιστία της συμβολομετρικής φάσης.

Ως θόρυβος χαρακτηρίζεται κάθε είδους ανεπιθύμητη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή, η οποία μειώνει την ικανότητα του συστήματος να ανιχνεύει ασθενικά σήματα (μείωση της ευαισθησίας του συστήματος). Τα σφάλματα των τροχιακών δεδομένων καθώς και η ατμοσφαιρική επίδραση δεν συμπεριλαμβάνονται στον παραπάνω ορισμό και εξετάζονται μεμονωμένα (Μερτίκας, 1999).

Η συνάφεια διαχωρίζεται σε επί μέρους τμήματα, που αντιστοιχούν σε σε συγκεκριμένες πηγές αποσυσχέτισης του σήματος (Rocca, 2015, Μερτίκας, 1999).

$$\gamma = \gamma_{\text{επεξεργασίας}} \cdot \gamma_{\text{θορύβου}} \cdot \gamma_{\text{κεντροειδούς}} \cdot \gamma_{\text{χωρική}} \cdot \gamma_{\text{χρονική}}$$

Ο όρος της συνάφειας επεξεργασίας ($\gamma_{\text{επεξεργασίας}}$) αφορά την αποσυσχέτιση που οφείλεται τόσο στον επεξεργαστή SAR για την παραγωγή των απεικονίσεων, όσο και στην επεξεργασία του σήματος. Ωστόσο, θεωρείται ότι οι επεξεργαστές και οι μεθοδολογίες συμβολομετρίας SAR διατηρούν τα χαρακτηριστικά των απεικονίσεων, οπότε θεωρείται αμελητέος.

Ο όρος του θορύβου ($\gamma_{\text{θορύβου}}$) αναφέρεται στην αποσυσχέτιση λόγω του θερμικού θορύβου εντός του αισθητήρα. Όσο ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, ο όρος του θορύβου θεωρείται αμελητέος.

Ο όρος του κεντροειδούς ($\gamma_{\text{κεντροειδούς}}$) αφορά την αποσυσχέτιση λόγω μερικής (ατελούς) επικάλυψης του φάσματος μεταξύ των δύο SAR απεικονίσεων στην διεύθυνση του αζιμούθιου. Γενικά παρατηρείται μετατόπιση του φάσματος (Doppler Centroid) λόγω μη απόλυτης παραλληλίας μεταξύ των δύο τροχιών κατά την διάρκεια των λήψεων. Ωστόσο, κατά την επεξεργασία του σήματος ο όρος αυτός αφαιρείται με την εφαρμογή κατάλληλου φίλτρου που διατηρεί το κοινό τμήμα του φάσματος των δύο απεικονίσεων (azimuth band-pass filtering).

Οι δύο τελευταίοι όροι (χωρική και χρονική συνάφεια) εξαρτώνται άμεσα από τη γεωμετρία λήψης και από τις μεταβολές των χαρακτηριστικών στην επιφάνεια του εδάφους. Αφορούν τη χωρική και χρονική αποσυσχέτιση του σήματος. Καθώς αυτοί είναι οι κύριοι όροι που επιδρούν στην μείωση της συνάφειας, περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες πηγές αποσυσχέτισης.

Η ακρίβεια των τροχιακών δεδομένων και η επίδραση της ατμόσφαιρας, παρά το γεγονός ότι δεν αποτελούν ουσιαστικά παράγοντες αποσυσχέτισης, καθώς δεν επενεργούν άμεσα στην συνάφεια του σήματος, δύνανται να υποβαθμίσουν σημαντικά την ποιότητα των συμβολογραφημάτων.

Αποσυσχέτιση (Decorrelation)

Η αποσυσχέτιση του συμβολομετρικού σήματος μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως αναλύονται παρακάτω (ESA, 2007):

Τροχιακά Δεδομένα

Αβεβαιότητες στα τροχιακά δεδομένα οδηγούν σε σφάλματα, των οποίων δεν είναι πολλές φορές εύκολη η αναγνώριση. Αυτά τα δεδομένα χρησιμεύουν στην εγγραφή των εικόνων με το DEM σε κοινό σύστημα αναφοράς, καθώς επίσης και στην αφαίρεση του θορύβου που ενδεχομένως να υπάρχει εξαιτίας της μετατόπισης της τροχιάς.

Για τα δορυφορικά συστήματα η κίνηση του δορυφόρου εκφράζεται μέσω της τροχιάς του. Η πραγματική θέση και ταχύτητα του δορυφόρου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή περιγράφεται από το άνυσμα θέσης (orbit state vector).

Για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης ενός δορυφόρου, απαραίτητη είναι η γνώση του συνόλου των ασκούμενων βαρυτικών και μη δυνάμεων κατά μήκος της τροχιάς του. Συνήθως χρησιμοποιούνται παρατηρήσεις SLR και αλτιμετρίας, η εγκυρότητα όμως των οποίων περιορίζεται στις περιοχές εμβέλειας των επίγειων σταθμών παρακολούθησης. Για τον δορυφόρο ENVISAT πραγματοποιούνται επί πλέον παρατηρήσεις μέσω του συστήματος DORIS. Ο προσδιορισμός των τροχιών ακριβείας πραγματοποιείται βάσει του βαρυτικού μοντέλου DGM-E04

Τροχιές ακριβείας για τους δορυφόρους ERS και ENVISAT δημοσιεύονται συστηματικά (<http://www.deos.tudelft.nl/ers/precorbs>) από το Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS) του Technical University of Delft, με μια καθυστέρηση μερικών μηνών από τη λήψη της απεικόνισης, ενώ διαθέτουν ακρίβεια της τάξεως των 5-6 cm.

Ατμοσφαιρική συμβολή

Δεδομένου ότι η λήψη δύο εικόνων SAR δεν είναι ταυτόχρονη, η διαδρομή της ακτινοβολίας σε κάθε περίπτωση μπορεί να επηρεαστεί διαφορετικά από την ατμόσφαιρα. Οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις θεωρούνται η κυριότερη πηγή σφάλματος της Συμβολομετρίας SAR. Η απομάκρυνση τέτοιου είδους επιδράσεων αποτελεί μια επίπονη και αρκετές φορές ασαφή διαδικασία.

Το ποσοστό του θορύβου που οφείλεται στην ατμοσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται αποκλειστικά από το μήκος κύματος του σήματος Ραντάρ. Όσο μικρότερο το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερη επίδραση έχει στην συμβολομετρική φάση, ενώ η επίδραση είναι εντελώς ανεξάρτητη από το μήκος του ανύσματος βάσης.

Η επίδραση της ιονόσφαιρας είναι μικρή, και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και των ιόντων. Η συγκέντρωση αυτών εξαρτάται από την ώρα της ημέρας, την ηλιακή ακτινοβολία, το γεωγραφικό πλάτος και άλλα. Διαταραχές της ιονόσφαιρας δημιουργούν ετερογενείς ατμοσφαιρικές μεταβολές, οι οποίες απομακρύνονται δυσκολότερα, λόγω του τοπικού χαρακτήρα επίδρασης στο σήμα.

Οι επιδράσεις της ιονόσφαιρας αφορούν την απόσβεση της ακτινοβολίας ανάλογα της πυκνότητας των ιόντων. Επίσης, συγκεκριμένα στρώματα της ιονόσφαιρας διαταράσσουν γενικά τη διέλευση των μικροκυμάτων, ενώ δημιουργούν στιγμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης της ακτινοβολίας, δηλαδή εκτρέπεται η διεύθυνση των μικροκυμάτων.

Το δορυφορικό σήμα επηρεάζεται κυρίως στην τροπόσφαιρα (το χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας), προκαλώντας την εξασθένηση αυτού. Οι κύριες αιτίες επιβράδυνσης της ακτινοβολίας είναι οι μεταβολές στην πίεση και τη θερμοκρασία (εξαρτάται από την εποχή) και η μεταβολή του ποσοστού υγρασίας, δηλαδή περιεκτικότητας σε υδρατμούς. Το φαινόμενο αυτό έχει επίπτωση στην ακρίβεια και στην ποιότητα των μετρήσεων του υψομέτρου και της παραμόρφωσης του εδάφους.

Τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για την αναγνώριση και αντιμετώπιση των ατμοσφαιρικών καθυστερήσεων στο σήμα Ραντάρ. Η αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων επιτυγχάνεται, είτε χωρικά με την εφαρμογή κατάλληλων φίλτρων υψηλής διέλευσης στα συμβολογραφήματα, είτε λαμβάνοντας υπόψη και τη χρονική διάσταση με τεχνικές πολλαπλών συμβολογραφήματων, καθώς οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις είναι ασυσχέτιστες στο χρόνο.

Χρονική Αποσυσχέτιση

Η χρονική αποσυσχέτιση (temporal decorrelation) αποτελεί τον σημαντικότερο ίσως περιοριστικό παράγοντα για την συμβολομετρία και προκαλείται από τις αλλαγές, που έχουν επέλθει στην περιοχή ενδιαφέροντος, κατά τη χρονική περίοδο που μεσολαβεί μεταξύ των δύο λήψεων. Η χρονική περίοδος μεταξύ των δύο λήψεων ονομάζεται πολλές φορές και σαν χρονικό άνυσμα βάσης (temporal baseline).

Οι αλλαγές, που έχουν συμβεί στην περιοχή μελέτης αφορούν τις μεταβολές στην κάλυψη/ χρήση γης και ιδιαίτερα τις μεταβολές της διηλεκτρικής σταθεράς των επίγειων στόχων (βλάστηση, έδαφος, κτίρια, κ.α.) Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μικρότερη χρονική αποσυσχέτιση του σήματος παρατηρείται σε αστικές περιοχές και σε βραχώδεις εκτάσεις. Η υψηλότερη αποσυσχέτιση εμφανίζουν οι δασώδεις περιοχές, καθώς και οι περιοχές με έντονη βλάστηση, όπως θαμνώδεις εκτάσεις, καλλιέργειες, περιοχές με μακία βλάστηση κ.α. Τέλος, οι ερημικές περιοχές διατηρούν διαχρονικά υψηλά επίπεδα συνάφειας.

Ο πολύ απότομος ρυθμός μεταβολής έχει ως επίπτωση να μην ανιχνεύονται οι αλλαγές και να χάνεται η συνοχή. Για να μη χαθεί η συνοχή θα πρέπει ο ρυθμός μεταβολής ανά εικονοστοιχείο να είναι μικρότερος από $\lambda/2$.

Στο σύνολο των μελετών επιλέγονται όσο το δυνατό μικρότερα χρονικά διαστήματα (μικρό χρονικό άνυσμα βάσης), καθώς έτσι επιτυγχάνεται ο περιορισμός της χρονικής αποσυσχέτισης (μικρός ρυθμός μεταβολής). Στις περιπτώσεις που απαιτούνται μεγάλα χρονικά διαστήματα, τότε επιλέγονται ημερομηνίες λήψεις που να εμπίπτουν στην ίδια εποχή του χρόνου, ώστε να αποφευχθούν οι εποχιακές μεταβολές της άνοιξης. Όσον αφορά τις εποχές, στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι οι λήψεις κατά την διάρκεια του καλοκαιριού παρουσιάζουν την μικρότερη αποσυσχέτιση, ενώ αυτές κατά την διάρκεια της άνοιξης έχουν τα χειρότερα αποτελέσματα.

Χωρική αποσυσχέτιση

Η χωρική αποσυσχέτιση εκφράζει την απώλεια συνάφειας λόγω της ατελούς επικάλυψης του φάσματος δύο SAR απεικονίσεων στην διεύθυνση των αποστάσεων. Οφείλεται στο γεγονός ότι μεταβάλλεται η γωνία λήψης του δορυφόρου στις δύο επισκέψεις, με αποτέλεσμα να αλλάζει η γεωμετρία της λήψης και οι δύο εικόνες να μη μπορούν να ταυτιστούν απόλυτα (coregistration). Ο συγκεκριμένος όρος αποσυσχέτισης διαχωρίζεται στις επί μέρους συνιστώσες, της γεωμετρικής αποσυσχέτισης (geometric decorrelation) και της αποσυσχέτισης χωρικής σκέδασης (scattering decorrelation).

Η γεωμετρική αποσυσχέτιση συναντάται πολλές φορές στη βιβλιογραφία και ως αποσυσχέτιση ανύσματος βάσης (baseline decorrelation), λόγω του ότι εκφράζει την απώλεια συνάφειας μεταξύ των SAR απεικονίσεων εξ αιτίας διαφορών στη γεωμετρία λήψης.

Η πιο σημαντική επίδραση αυτού του φαινομένου είναι ότι υπάρχει ένα κρίσιμο άνυσμα βάσης πάνω από το οποίο, η συμβολομετρική φάση είναι καθαρός θόρυβος. Το κρίσιμο άνυσμα βάσης εξαρτάται από τη διάσταση του εικονοστοιχείου στο έδαφος (και από την κλίση του εδάφους), από τη συχνότητα του ραντάρ, και από την απόσταση ανιχνευτή-στόχου. Στην περίπτωση των ERS και ENVISAT, το κρίσιμο άνυσμα βάσης για οριζόντιο έδαφος είναι περίπου 1150 m.

Η αποσυσχέτιση λόγω χωρικής σκέδασης (volume scattering) του σήματος Ραντάρ παρατηρείται κατά την διάδοση του σήματος Ραντάρ στην μάζα των υλικών και συνδέεται με χωρικές ανομοιογένειές του, σε κλίμακες συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (Μερτίκας, 1999). Κυρίως αφορά την βλάστηση, όπου το σήμα διεισδύει στην κόμη των δέντρων, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση επιστροφής αυτού.

Η γεωμετρική αποσυσχέτιση είναι αδύνατο να αποφευχθεί, αλλά δύναται να περιοριστεί με την εφαρμογή φίλτρων μέσου όρου, σε βάρος όμως της χωρικής ανάλυσης.

1.5 Διαφορική Συμβολομετρία Εικονοληπτικών SAR

Μια επέκταση της Συμβολομετρίας είναι η Διαφορική Συμβολομετρία SAR (Differential Interferometry - InSAR). Η διαφορική Συμβολομετρία χρησιμοποιείται για να ανιχνεύσει πολύ μικρές υψομετρικές αλλαγές (της τάξης ± 1 cm ή λιγότερο). Η κύρια ιδέα είναι να χρησιμοποιηθεί μια πλατφόρμα SAR που διέρχεται δύο ή περισσότερες φορές πάνω από την ίδια περιοχή. Εάν η δεύτερη πτήση ή οι επόμενες πτήσεις αναπαράγουν ακριβώς το επίγειο ίχνος της πρώτης πτήσης, οι αλλαγές της φάσης των σημάτων ραντάρ μεταξύ των εκάστοτε χρονικών στιγμών λήψης κάθε εικόνας SAR μπορούν να μετρηθούν. Μεταξύ των εικόνων δεν θα υπήρχε καμία αλλαγή φάσης καθόλου εκτός αν στο μεταξύ υπήρξε μια φυσική αλλαγή στην απεικονιζόμενη περιοχή, όπως μικρομετακινήσεις του εδάφους από σεισμικά γεγονότα, κλπ. (ESA, 2007).

Η βασική ιδέα της διαφορικής συμβολομετρίας είναι η απαλοιφή του όρου της τοπογραφίας από την παρατηρούμενη συμβολομετρική φάση. Αυτό επιτρέπει την ανάδειξη της φάσης που σχετίζεται με διαφορικές κινήσεις που έλαβαν χώρα στο διάστημα μεταξύ δύο λήψεων. Η συμβολομετρία SAR είναι αποτελεσματική κυρίως για μετακινήσεις του εδάφους κατά τη διεύθυνση παρατήρησης (π.χ. ανυψώσεις, καθιζήσεις) (ESA, 2007).

Η φάση η οποία σχετίζεται με την τοπογραφία, μπορεί να υπολογιστεί είτε χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό μοντέλο ανάγλυφου DEM (2 περασμάτων διαφορική συμβολομετρία - 2-pass InSAR) ή χρησιμοποιώντας ένα ανεξάρτητο συμβολογράφημα, χωρίς να περιέχει τον παράγοντα της φάσης που οφείλεται σε διαφορική παραμόρφωση (3 και 4 περασμάτων διαφορική συμβολομετρία - 3 ή 4-pass InSAR). Ο αριθμός ο οποίος χαρακτηρίζει την κάθε τεχνική, δείχνει τον αριθμό των απεικονίσεων SAR που απαιτούνται, έτσι ώστε να παραχθεί ένα διαφορικό συμβολογράφημα. Στην πράξη, η επιλογή μίας εκ των παραπάνω μεθοδολογιών, εξαρτάται από την διαθεσιμότητα των δεδομένων και στην παρουσία σφαλμάτων της αποκατεστημένης φάσης (phase unwrapping), τα οποία προκύπτουν από απότομα εδάφη (ESA, 2007).

Πιο αναλυτικά, η διαφορική συμβολομετρία 2 περασμάτων (2-pass InSAR) απαιτεί την χρησιμοποίηση ενός συμβολομετρικού ζεύγους και ενός DEM. Η βασική ιδέα είναι ότι ένα συμβολογράφημα (περιέχει τη φάση που αντιστοιχεί στην τοπογραφία του ανάγλυφου) προσομοιώνεται βάσει του DEM. Στην συνέχεια, η φάση που οφείλεται στην τοπογραφία, αφαιρείται από το αρχικό συμβολογράφημα.

Η διαφορική συμβολομετρία τριών περασμάτων (3-pass InSAR) βασίζεται στη χρησιμοποίηση 3 SAR απεικονίσεων εκ των οποίων η γεωμετρία της μίας επιλέγεται ως αναφορά. Στη συνέχεια, παράγονται δύο συμβολογραφήματα μεταξύ της εικόνας αναφοράς και των υπολοίπων δύο. Η βασική ιδέα είναι ότι επιλέγονται αρχικά δύο SAR απεικονίσεις με μεγάλο άνυσμα βάσης για την δημιουργία ενός DEM (που περιέχει την πληροφορία της τοπογραφίας). Στην συνέχεια με την τρίτη εικόνα

παράγεται ένα απλό συμβολογράφημα, από το οποίο αφαιρείται η φάση λόγω τοπογραφίας από το παραχθέν DEM. Ωστόσο, σ' αυτήν την περίπτωση η αποκατάσταση της φάσης είναι απαραίτητη (ESA, 2007).

Τέλος, διαφορική συμβολομετρία τεσσάρων περασμάτων (4-pass InSAR), βασίζεται σε δύο ανεξάρτητα συμβολομετρικά ζεύγη (4 SAR απεικονίσεις). Η ιδέα είναι ότι μόνο το ένα από τα δύο ζεύγη, περιλαμβάνει την διαφορική φάση, ενώ το άλλο χρησιμοποιείται ως αναφορά, με σκοπό την αφαίρεση της φάσης που αντιστοιχεί στην τοπογραφία. Η 4-pass μεθοδολογία είναι σχεδόν όμοια με την 3-pass, με την διαφορά ότι στην επεξεργασία χρησιμοποιούνται διαφορετικές γεωμετρίες (όχι εικόνα αναφοράς). Συνεπώς, τα συμβολομετρικά προϊόντα του ενός συμβολομετρικού ζεύγους, χρειάζεται να αποκτήσουν την ίδια γεωμετρία του δεύτερου συμβολομετρικού ζεύγους.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της 3-pass μεθοδολογίας έναντι της 2-pass, είναι ότι δεν απαιτείται DEM. Ωστόσο, η ευρεία διάθεση ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου, επαρκούς χωρικής ανάλυσης για εφαρμογές συμβολομετρίας (π.χ. SRTM), επιτρέπει πλέον την αξιόπιστη και απ' ευθείας εκτίμηση της τοπογραφικής φάσης. Αποφεύγεται έτσι ο υπολογισμός της συγκεκριμένης συνιστώσας του σήματος από SAR απεικονίσεις, διαδικασία που εμπεριέχει επί πλέον ασάφειες. Ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, λόγω της έκτασης των φαινομένων αναστροφής, αλλά και της σκίασης, η χρήση SAR απεικονίσεων παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα. Επιπλέον η χρησιμοποίηση DEM με σκοπό την εξαγωγή της τοπογραφικής φάσης, βοηθά στην αποφυγή σφαλμάτων της αποκατεστημένης φάσης, καθώς επίσης και την αποφυγή σφαλμάτων της τοπογραφικής φάσης που οφείλονται στην ατμόσφαιρα και την ιονόσφαιρα.

Η συμβολομετρική φάση που απεικονίζεται σε ένα συμβολογράφημα SAR δεν περιέχει μόνο τη φάση από την τοπογραφία και την φάση από την παραμόρφωση του εδάφους. Μια σειρά από διάφορους παράγοντες συμβάλουν στην συμβολομετρική φάση και φυσικά πρέπει να αναγνωρίζονται και να απομακρύνονται πριν την οποιαδήποτε ερμηνία του γραφήματος. Για να τονιστούν οι κύριες ιδιότητες της συμβολομετρικής φάσης η οποία αποτελεί το άθροισμα επιμέρους συνιστωσών, παραθέτεται η παρακάτω μαθηματική εξίσωση (Piyush, 2003, Rocca, 2015):

$$\Phi = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{disp}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} + n \cdot 2\pi$$

φ_{flat} : φάση λόγω επίπεδης γης

φ_{topo} : φάση λόγω της τοπογραφίας

φ_{disp} : φάση λόγω της εδαφικής παραμόρφωσης

φ_{atm} : φάση λόγω της ατμοσφαιρικής καθυστέρησης του σήματος

φ_{noise} : φάση λόγω του θορύβου

$n \cdot 2\pi$: όρος ακέραιης ασάφειας

Η φάση της επίπεδης γης αναφέρεται στην φάση που προκύπτει από την καμπυλότητα της επιφάνειας της Γης. Η καμπυλότητα προκαλεί μεταβολές στην γωνία παρατήρησης (γωνία πρόπτωσης) στην διεύθυνση των αποστάσεων (εγκάρσια στην πορεία του αζιμούθιου). Η φάση αυτή δημιουργεί ένα μοτίβο παράλληλων κροσσών συμβολής στην διεύθυνση του αζιμούθιου που επικαλύπτουν τους υπόλοιπους κροσσούς. Η συχνότητα αυτών των κροσσών είναι ανάλογη του καθέτου ανύσματος βάσης και ο προσδιορισμός της φάσης αυτής γίνεται εύκολα από τα τροχιακά δεδομένα.

Ο μετασχηματισμός Fourier της συμβολομετρικής φάσης δίνει την μετατόπιση φάσματος που οφείλεται στην επίπεδη Γη. Η διαδικασία αφαίρεσης της φάσης της επίπεδης Γης από τη συμβολομετρική φάση ονομάζεται εξομάλυνση του συμβολογραφήματος (interferogram flattening) και είναι πραγματοποιείται πριν την εκτύλιξη της φάσης.

Η φάση της τοπογραφίας αφορά την ύπαρξη υπολειμματικής τοπογραφικής φάσης στα διαφορικά συμβολογραφήματα και σχετίζεται άμεσα με το μήκος του καθέτου ανύσματος βάσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο υπολογισμός του πραγματοποιείται είτε με προσομοίωση της φάσης βάσει ενός υπάρχοντος DEM και των τροχιακών δεδομένων, ή από κατάλληλα επιλεγμένες ανεξάρτητες SAR απεικονίσεις. Όσο μεγαλύτερο είναι το άνυσμα βάσης, τόση περισσότερη θα είναι η φάση της τοπογραφίας που θα περιέχεται στο συμβολογράφημα και συνεπώς απαιτείται μεγάλης ακρίβειας DEM για την αφαίρεση του όρου αυτού. Γι' αυτόν τον λόγο επιλέγονται μικρότερα ανύσματα βάσης, ώστε η αφαίρεση της τοπογραφίας να επιτυγχάνεται και με μικρότερης ακρίβειας DEM (ESA, 2007).

Η φάση λόγω επίδρασης της ατμόσφαιρας αναφέρεται στην καθυστέρηση του σήματος εξαιτίας των ατμοσφαιρικών συνθηκών, όπως έχει προαναφερθεί. Κυρίως εισάγεται μη συστηματικό σφάλμα στις παρατηρήσεις της συμβολομετρίας Ραντάρ, εξαιτίας του στοχαστικού του χαρακτήρα. Ετερογενείς αλλαγές στην κατάσταση της ατμόσφαιρα μπορούν να οδηγήσουν σε μετατόπιση της φάσης, λόγω των μικρών μεταβολών στην ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας. Αυτές οι τοπικές μετατοπίσεις είναι γενικά μικρότερες από π κύκλους. Η απομάκρυνση τέτοιων επιδράσεων από το σήμα αποτελεί αρκετά δύσκολη και επίπονη διαδικασία, ενώ σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητη η διάθεση συμπληρωματικών δεδομένων από άλλες πηγές παρατήρησης.

Η φάση λόγω θορύβου αφορά τον θόρυβο που εισάγεται στην φάση εξαιτίας του μη επικαλυπτόμενου μέρους του φάσματος μεταξύ των δύο SAR απεικονίσεων, καθώς επίσης και από την παρουσία στιγμάτων στις απεικονίσεις. Η απομάκρυνση του θορύβου επιτυγχάνεται με την εφαρμογή φίλτρων στο πεδίο των συχνοτήτων και με χωρικά φίλτρα μέσης τιμής, εις βάρος όμως της χωρικής ανάλυσης.

Τέλος, ο όρος ακέραιης ασάφειας αντιστοιχεί στο ακέραιο πολλαπλάσιο 2π (ένας πλήρης κύκλος) που προστίθεται στην μετρούμενη τιμή της φάσης προκειμένου να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Εάν αφαιρεθούν επιτυχώς οι όροι της τοπογραφίας, της επίπεδης Γης και του θορύβου και θεωρώντας αμελητέα την επίδραση της ατμόσφαιρας, η τιμή της διαφορικής φάσης αντιστοιχεί πλέον στην παραμόρφωση του εδάφους στην διεύθυνση LOS. Μετατόπιση μισού μήκους κύματος ($\lambda/2$) στην διεύθυνση του LOS δημιουργεί έναν κροσσό συμβολής στο διαφορικό συμβολογράφημα (ESA, 2007).

Πρέπει να τονιστεί ότι, καθώς η παρατήρηση λαμβάνει χώρα κατά μήκος του LOS, δεν είναι εφικτή η πλήρης περιγραφή του πραγματικού τρισδιάστατου πεδίου μετακινήσεων μιας περιοχής. Είναι εμφανές ότι τέτοιου είδους διατάξεις προσανατολίζονται κυρίως στην αναγνώριση κατακόρυφων κινήσεων της επιφάνειας, ενώ στερούνται ευαισθησίας στην διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου. Ως αποτέλεσμα προκύπτει σημαντική υποεκτίμηση ακόμη και η πλήρης αδυναμία ανίχνευσης μετακινήσεων στην διεύθυνση του αζιμούθιου.

Εκμεταλλευόμενοι την διάταξη των περισσότερων δορυφόρων τηλεπισκόπησης, που παρέχουν δύο διευθύνσεις παρατήρησης μία κατά την καθοδική και μία κατά την ανοδική τροχιά του δορυφόρου, είναι δυνατόν να επιλυθούν δύο προβολές του τρισδιάστατου ανύσματος μετακίνησης από τις συνολικά τρεις συνιστώσες μετακίνησης, η κατακόρυφη συνιστώσα καθώς και ένας γραμμικός συνδυασμός των οριζόντιων (ESA, 2007).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ – ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΜΑΖΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος κατολίσθηση (landslide) περιλαμβάνει την έννοια της ολίσθησης, της πτώσης, της ανατροπής και της ροής, αν και ετυμολογικά δεν διακρίνονται όλες οι παραπάνω κατηγορίες. Επιπλέον, το φαινόμενο της κατολίσθησης μπορεί να παρατηρηθεί τόσο στη ξηρά όσο και μέσα σε θάλασσες, λίμνες και ταμειυτήρες.

Ο πρώτος ορισμός του όρου δόθηκε από τον Terzaghi (1950), σύμφωνα με τον οποίο κατολίσθηση είναι μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω.

Στη συνέχεια, οι Zaruba and Menchl (1969) ορίζουν την κατολίσθηση σαν μία γρήγορη κίνηση πετρωμάτων που οφείλεται στην ολίσθηση ενός τμήματος πρανούς, το οποίο διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μία καλά καθορισμένη επιφάνεια. Διακρίνονται τέσσερις κύριες κατηγορίες μετακίνησης πρανών, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιομορφίες της γεωλογικής δομής των περιοχών, ανάλογα με τη σύσταση των υλικών που μετακινούνται.

Ο Varnes (1978) στην έκδοση “Landslides: analysis and control” χρησιμοποιεί τον όρο «μετακίνηση μαζών» (mass movements) αντί του όρου κατολίσθηση και με αυτόν περιλαμβάνει κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό. Με την έννοια αυτή δεν περιλαμβάνονται στις κατολισθήσεις φαινόμενα όπως οι καθιζήσεις, οι χιονοστιβάδες, και οι μετακινήσεις του πάγου.

2.2 Ταξινόμηση Κατολισθήσεων

Τα δυο γνωστότερα συστήματα ταξινόμησης των κατολισθητικών κινήσεων είναι αυτά που προτάθηκαν από τον Sharpe (1939) και τον Varnes (1958). Η ταξινόμηση κατά Sharpe λαμβάνει ως βασικές παραμέτρους τον τύπο του υλικού κατολίσθησης, την περιεχόμενη υγρασία, τον τύπο της κίνησης (κατάπτωση, ολίσθηση, ροή) και τέλος, την ταχύτητα της κίνησης.

Ωστόσο, η πλέον αποδεκτή και ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η ταξινόμηση κατά Varnes (1978) που χρησιμοποιεί τον όρο «μετακίνηση μαζών». Ο όρος περιλαμβάνει κάθε μετακίνηση τμήματος πρανούς που οφείλεται σε ολίσθηση, κατάπτωση, ανατροπή, ροή και ερπυσμό. Δεν περιλαμβάνει όμως τις καθιζήσεις, τις χιονοστιβάδες και τις μετακινήσεις πάγου.

Ο Varnes πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης των κατολισθήσεων που περιλαμβάνει όλες τις εδαφικές μετακινήσεις (με εξαίρεση τις καθιζήσεις). Για την κατηγοριοποίηση χρησιμοποιεί δύο κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο αφορά τον τύπο μετακίνησης, όπου διακρίνεται σε πτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές εξαπλώσεις και ροές. Επιπλέον υπάρχει μια ακόμα ομάδα που περιλαμβάνει την σύνθεση των παραπάνω τύπων. Το δεύτερο κριτήριο αφορά το είδος του μετακινούμενου υλικού γίνεται διακριτό από α) το βραχώδες υπόβαθρο (πετρώματα) και από β) τους εδαφικούς σχηματισμούς (κορήματα και γαίες).

Τα είδη κατολισθητικών κινήσεων σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Varnes είναι τα ακόλουθα:

➤ Πτώσεις (Falls)

Πρόκειται για την αποκόλληση τμήματος εδάφους ή βράχου από απότομο πρανές κατά μήκος μιας επιφάνειας με μικρή ή σχεδόν μηδενική διατμητική αντοχή. Η κίνηση του υλικού γίνεται μέσω κύλισης και αναπήδησης και χαρακτηρίζεται από μεγάλη ταχύτητα μετακίνησης.

Οι πιο συχνές περιπτώσεις είναι οι πτώσεις βράχων (rock falls), που παρατηρούνται είτε σε εναλλαγές συμπαγών και λιγότερο συμπαγών πετρωμάτων, είτε σε συμπαγή πετρώματα με δυσμενή γεωμετρία ασυνεχειών. Χαρακτηριστικά είναι τα φαινόμενα της πρώτης περίπτωσης στον σχηματισμό του φλύσχη (εναλλαγές ιλυολίθων-ψαμμιτών) ή και των νεογενών ιζημάτων (εναλλαγές μαργών-ψαμμιτών και κροκαλοπαγών). Στην δεύτερη περίπτωση τα φαινόμενα αφορούν αποκολλήσεις –καταπτώσεις, που υποβοηθούνται από την παρουσία ρωγμών εξαιτίας προϋπαρχόντων ασυνεχειών.

➤ Ανατροπές (Topples)

Το φαινόμενο εμφανίζεται κυρίως σε βραχώδη πρανή. Η κίνηση οφείλεται σε τάσεις οι οποίες προκαλούν περιστροφή προς τα εμπρός, γύρω από ένα σημείο ή άξονα που εντοπίζεται κάτω από το κέντρο βάρους της βραχώδους ή εδαφικής μάζας που επηρεάζεται. Στη συνέχεια, τμήματα αποχωρίζονται από την υπόλοιπη μάζα, αναπηδώντας και πέφτοντας προς τα κατόντη του πρανούς.

Προκαλείται κυρίως από την βαρύτητα και από τις δυνάμεις που ασκούνται στα γειτονικά τεμάχια, αλλά και από την επίδραση του νερού που γεμίζει τις ασυνέχειες. Το φαινόμενο μπορεί σταδιακά να εξελιχθεί σε πτώση ή ολίσθηση της μετακινούμενης μάζας, ανάλογα με την γεωμετρία της επιφάνειας αποχωρισμού και τον προσανατολισμό των ασυνεχειών.

➤ Ολισθήσεις (Slides)

Πρόκειται για την προς τα κάτω κίνηση εδαφικής ή βραχώδους μάζας. Κυρίως λαμβάνει χώρα κατά μήκος επιφανειών θραύσης ή σχετικά λεπτών ζωνών διάτμησης. Η κίνηση αρχικά, δεν εκδηλώνεται ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια αστοχίας. Ο όγκος της μετακινούμενης μάζας μεγεθύνεται από την αρχική περιοχή τοπικής αστοχίας. Συχνά τα πρώτα σημάδια μετακίνησης είναι ρωγμές στην αρχική επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος της οποίας θα διαμορφωθεί το κύριο μέτωπο της ολίσθησης. Η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει πέρα από τον πόδα της επιφάνειας θραύσης, καλύπτοντας την αρχική εδαφική επιφάνεια στο πρηνές, η οποία τελικά μεταπίπτει σε επιφάνεια διαχωρισμού.

Ο Varnes (1978) διαχώρισε τις ολισθήσεις σε περιστροφικές και μεταθετικές.

Οι **περιστροφικές ολισθήσεις** ή κυκλικές ολισθήσεις κινούνται κατά μήκος μιας κεκλιμένης επιφάνειας αστοχίας η οποία είναι κοίλη προς τα πάνω. Όταν η επιφάνεια αστοχίας έχει προφίλ κυκλικό ή κυκλοειδές, η κινηματική υπαγορεύει ότι η μετακινούμενη μάζα θα κινηθεί κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης έχοντας υποστεί μικρή εσωτερική παραμόρφωση. Ο άξονας της κυκλικής επιφάνειας είναι παράλληλος στον άξονα γύρω από τον οποίο η μάζα ολισθαίνει. Συνήθως ολισθήσεις με κυκλική επιφάνεια θραύσης, συμβαίνουν σε ομοιογενή υλικά και κυρίως σε εδαφικούς σχηματισμούς. Στην περίπτωση που παρατηρούνται περισσότερες της μίας κοίλες επιφάνειες ολίσθησης, η κατολίσθηση αναφέρεται με τον όρο “slump”.

Οι **μεταθετικές ολισθήσεις** αφορούν σε μια μετακινούμενη μάζα η οποία ολισθαίνει κατά μήκος μιας επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας θραύσης. Συνήθως η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει παράλληλα με την επιφάνεια ολίσθησης και πάνω σ’ αυτή. Οι μεταθετικές ολισθήσεις είναι γενικά μικρότερου βάθους από τις περιστροφικές. Σε βραχώδη πρηνή καλούνται ολισθήσεις τεμαχών ή επίπεδες ολισθήσεις. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να δημιουργείται από μία ή δύο ασυνέχειες οι οποίες προκαλούν τη μετακίνηση της μάζας που περικλείεται από αυτές προς τα κατάντη, σχηματίζοντας μία σφήνα.

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των παραπάνω υποδιαίρεσεων είναι ότι οι περιστροφικές ολισθήσεις, με την κίνησή τους τείνουν να ισορροπήσουν και πάλι τη μετακινούμενη μάζα, ενώ οι μεταθετικές ολισθήσεις συνεχίζουν ανεξέλεγκτα, ιδιαίτερα αν η επιφάνεια αποκόλλησης έχει μεγάλη κλίση. Καθώς η μεταθετική ολίσθηση εξελίσσεται, η μετακινούμενη μάζα μπορεί να σπάσει, ιδιαίτερα αν η ταχύτητα ή η περιεκτικότητα σε νερό αυξηθούν.

➤ **Εκτάσεις (Spreads)**

Είναι κινήσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από πλευρικές εκτάσεις συνεκτικών υλικών, τα οποία υπέρκεινται μαλακών υλικών. Διακρίνονται σε εκτάσεις βράχων και σε εκτάσεις ρευστοποίησης. Οι εκτάσεις βράχων απαντούν σε ισχυρά διαρρηγμένες βραχομάζες, και συχνά σχετίζονται με καθίζηση της διαρρηγμένης μάζας όταν υπόκεινται πιο μαλακά υλικά. Συχνά δεν είναι δυνατή η αναγνώριση μια επιφάνειας ολίσθησης στο υπόβαθρο, ούτε μιας πλήρως προσδιορισμένης ζώνης πλαστικής ροής. Η μετατόπιση κατανέμεται σε όλη την εκτινόμενη μάζα και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πολύ αργή.

Οι εκτάσεις ρευστοποίησης δημιουργούνται σε ευαίσθητες αργίλους και ιλύες, οι οποίες όταν διαταχθούν χάνουν την αντοχή τους και η δομή τους έχει καταστραφεί. Η κίνηση ξεκινάει σαν εκτεταμένη καθίζηση και μπορεί να είναι μεγάλης έως πολύ μεγάλης ταχύτητας.

➤ **Ροές (Flows)**

Οι ροές, ξηρές ή υγρές, γρήγορες ή αργές, εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά. Αντίθετα στο βραχώδες υπόβαθρο, οι αντίστοιχες μετακινήσεις περιλαμβάνουν τις πολύ αργές παραμορφώσεις που κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές κοντινές ρωγμές-διακλάσεις, καθώς και εκείνες που παρατηρούνται μέσα στην μάζα του πετρώματος και προέρχονται από κάμψη, πτύχωση ή διόγκωση. Από άποψη κινηματικής η κίνηση θα μπορούσε να συγκριθεί με ιξώδη ροή. Συνήθως η κίνηση είναι πολύ γρήγορη, ενώ είναι πολύ επικίνδυνη με την παρουσία νερού. Αντίθετα, στις περιπτώσεις που η κίνηση είναι εξαιρετικά αργή, τότε οι ροές ταξινομούνται στον ερπυσμό.

Διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

Ροές βραχώδους τεμαχίων (rock flows). Αναφέρονται σε ροή μικρών τεμαχίων πετρώματος και οι μετακινήσεις είναι εξαιρετικά αργές και σχετικά σταθερές στο χρόνο. Τέτοιες μετακινήσεις προέρχονται από πτυχώσεις, κάμψεις (π.χ. κάμψεις κεφαλών στρωμάτων) διογκώσεις ή άλλες εκδηλώσεις πλαστικής παραμόρφωσης. Μετακινήσεις αυτού του είδους παρατηρούνται συχνότερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο.

Ροές γαιών (earth flows). Εμφανίζονται σε πρηνή μικρής έως μέτριας κλίσης και αφορούν λεπτόκοκα εδάφη (άργιλοι και ιλύες). Η μάζα των υλικών κινείται με την μορφή ενός ιξώδους ρευστού. Όταν η περιεκτικότητα της μάζας σε νερό είναι μεγάλη, τότε η ροή αναφέρεται ως λασποροή (mudflow).

Ροές κορημάτων (debris flows). Εμφανίζονται σε πρηνή μεγάλης κλίσης και αφορούν χαλαρά χονδρόκοκα υλικά. Το φαινόμενο εκδηλώνεται μετά από ξαφνική εισροή νερού στα υλικά (έντονη βροχόπτωση) και συνήθως χαρακτηρίζεται από μεγάλη ταχύτητα (βίαιες ροές κορημάτων).

➤ **Ερπυσμός (Creep)**

Οι αργές ροές ταξινομούνται από τον Varnes και από πολλούς άλλους ερευνητές στον ερπυσμό (creep) που είναι μία αργή και όχι άμεσα ορατή κίνηση του επιφανειακού μανδύα του εδάφους ή του σαθρού καλύμματος των πετρωμάτων. Μπορεί να θεωρηθεί σαν μια φυσική εξέλιξη της κλίσης της κλιτύος που οφείλεται σε εσωτερικές τάσεις και υποβοηθείται από την βαρύτητα. Το φαινόμενο μακροσκοπικά αναγνωρίζεται από την κλίση δέντρων, στύλων ή ακόμα και από τη σχετική θέση των θραυσμάτων κάποιου χαρακτηριστικού γεωλογικού ορίζοντα.

➤ **Σύνθετη (Complex)**

Είναι ένας συνδυασμός τόσο των μετακινήσεων, όσο και των υλικών που περιγράφηκαν ως τώρα. Εκδηλώνονται, είτε στα διάφορα τμήματα της μετακινούμενης μάζας, είτε στα διάφορα στάδια της εξέλιξης της μετακίνησης. Σαν σύνθετες ολισθήσεις ταξινομούνται αυτές στις οποίες διαφορετικού τύπου μετακινήσεις γίνονται σε διαφορετικές περιοχές της ολισθαίνουσας μάζας, μερικές φορές ταυτόχρονα.

Πίνακας 2.1: Σύντομη ταξινόμηση των κατολισθητικών κινήσεων (Varnes, 1978).

ΤΥΠΟΙ ΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΕΛΑΦΟΥΣ		
		Βραχώδης μάζα	Εδάφη	
			Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα
Πτώσεις		Πτώση βράχων	Πτώση φερτών υλικών	Πτώση εδάφους
Ανατροπές		Ανατροπή βράχων	Ανατροπή φερτών υλικών	Ανατροπή εδάφους
Ολισθήσεις	Περιστροφικές	Ολίσθηση βράχων	Ολίσθηση φερτών υλικών	Ολίσθηση εδάφους
	Μεταφορικές			
Εξάπλωσεις		Εξάπλωση βράχων	Εξάπλωση φερτών υλικών	Εξάπλωση εδάφους
Ροές		Ροή βράχων	Ροή φερτών υλικών	Ροή εδάφους
Σύνθετες				

2.3 Ενεργότητα κατολισθήσεων

Ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες στην έρευνα και την μελέτη των κατολισθήσεων είναι ο προσδιορισμός της ενεργότητας τους (activity). Η ομάδα εργασίας της UNESCO (WP\WLI,1993) πρότεινε τις παρακάτω παραμέτρους για τον προσδιορισμό της ενεργότητας των κατολισθήσεων:

- Το καθεστώς ενεργότητας που αναφέρεται στο χρονικό των μετακινήσεων.
 - i) Ενεργές (active) χαρακτηρίζονται οι κατολισθήσεις οι οποίες παρουσιάζουν πρόσφατες μετακινήσεις. Οι μορφολογικοί τους χαρακτήρες αναγνωρίζονται εύκολα και δεν έχουν αλλοιωθεί σημαντικά από τις διεργασίες της επιφανειακής αποσάθρωσης και διάβρωσης. Από τις κατολισθήσεις αυτές άλλες εκδηλώνονται για πρώτη φορά και άλλες επανενεργοποιούνται μετά από ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο είχαν σταθεροποιηθεί (επανενεργοποιημένες-reactivated). Οι κατολισθήσεις που μετακινήθηκαν τον τελευταίο εποχικό κύκλο και οι οποίες κατά την παρούσα περίοδο δεν μετακινούνται, χαρακτηρίζονται ως παροδικά ανενεργές ή υπό αναστολή (suspended).
 - ii) Ανεργές (inactive) αναφέρονται οι κατολισθήσεις οι οποίες παραμένουν σταθερές για περισσότερο από ένα έτος (κατά τον τελευταίο εποχικό κύκλο). Αν τα αίτια που συντελούν στην εκδήλωση της κατολίσθησης παραμένουν, τότε η κατολίσθηση βρίσκεται σε λανθάνουσα κατάσταση (dormant). Αν όμως αυτά έχουν εκλείψει, τότε πρόκειται για μη ενεργοποιήσιμη κατολίσθηση (abandoned). Σταθεροποιημένη (stabilized) θεωρείται μία ανενεργή κατολίσθηση όταν έχουν ληφθεί μέτρα προστασίας και σταθεροποίησης.
 - iii) Τέλος, απολιθωμένη (relict) καλείται μία κατολίσθηση η οποία έχει αφήσει ανεξίτηλα τα ίχνη της στο πρηνές για πάρα πολλά χρόνια, χωρίς να έχει επανενεργοποιηθεί.
- Τον τύπο ενεργότητας, με τον οποίο καθορίζεται ο τρόπος που εκδηλώνονται οι διαφορετικές μετακινήσεις μέσα στην ίδια την μάζα της κατολίσθησης.

Ως **σύνθετη (complex)** χαρακτηρίζονται οι κατολισθήσεις που γίνονται με διαφορετικού τύπου μετακινήσεις σε διαφορετικές περιοχές της ολισθαίνουσας μάζας, μερικές φορές ταυτόχρονα (π.χ. ολίσθηση και ανατροπή). Επίσης μία κατολίσθηση που εμφανίζει επαναλαμβανόμενες κινήσεις του ίδιου τύπου με επέκταση της επιφάνειας θραύσης καλείται **πολλαπλή (multiple)**.

Οι **διαδοχικές (successive)** κατολισθήσεις είναι παρόμοιες με τις πολλαπλές, αλλά στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει επικάλυψη του υλικού της μιας κατολίσθησης με το αντίστοιχο της άλλης, και η κάθε μία αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση.

Τέλος μια **απλή (single)** κατολίσθηση, σε αντίθεση με την σύνθετη εκδηλώνεται πάντα με έναν τύπο μετακίνησης, χωρίς η μάζα που ολισθαίνει να διαχωρίζεται σε διάφορα μέρη κινούμενα μερικώς ανεξάρτητα μεταξύ τους.

2.4 Ταχύτητα μετακίνησης.

Η ταχύτητα μετακίνησης μιας κατολίσθησης είναι παράμετρος που σχετίζεται άμεσα με τον βαθμό επικινδυνότητας της, τις επιπτώσεις που έχει σε ανθρώπινες ζωές, βλάβες κτηρίων και έργων υποδομής καθώς και σε απώλεια γης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι συχνά είναι δύσκολος ο προσδιορισμός της ταχύτητας μιας κατολίσθησης, λόγω της διαφορετικής ταχύτητας που αναπτύσσει στα διάφορα στάδια εξέλιξής της ή ακόμα και στα διάφορα τμήματα της ή ακόμα και λόγω της διαφορετικής ταχύτητας των διάφορων τύπων μετακίνησης που αυτή περιλαμβάνει (στην περίπτωση των σύνθετων ολισθήσεων).

Πίνακας 2.2: Κλίμακα ταχύτητας μετακίνησης (UNESCO, 1995).

Κατηγορία	Χαρακτηρισμός	Όρια Ταχύτητας
7	Εξαιρετικά γρήγορη	> 5 m/sec
6	Πολύ γρήγορη	> 3 m/min
5	Γρήγορη	> 1.8 m/hr
4	Μέτρια	> 13 m/month
3	Αργή	> 1.6 m/yr
2	Πολύ αργή	< 16 m/yr
1	Εξαιρετικά αργή	> 16 m/yr

Οι επιπτώσεις που έχει μια κατολίσθηση αυξάνουν σημαντικά με την αύξηση της ταχύτητας μετακίνησης, αφού γενικά οι πολύ γρήγορες κατολισθήσεις προκαλούν μεγαλύτερες απώλειες σε ζωές και περιουσίες σε σχέση με τις αργές. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι πιθανές βλάβες που μπορούν να προκληθούν από κατολισθήσεις που ανήκουν στις επτά διαφορετικές κατηγορίες με βάση την ταχύτητα μετακίνησης τους.

Πίνακας 2.3: Πιθανές βλάβες ανάλογα με την ταχύτητα μετακίνησης (UNESCO, 1995).

Κατηγορία	Πιθανές βλάβες και επιπτώσεις
7	Καταστροφές κτηρίων λόγω έντονων μετακινήσεων ή πρόσκρουσης της μετακινούμενης μάζας, πολλοί θάνατοι, απίθανη η ύπαρξη επιζώντων
6	Μερικοί θάνατοι, περιορισμένος χρόνος για την ασφαλή φυγή όλων των κατοίκων
5	Πιθανή η ασφαλής φυγή των κατοίκων. Σπίτια, εγκαταστάσεις και δίκτυα υποδομής με μεγάλες βλάβες ή τελείως κατεστραμμένα
4	Μερικές από τις προσωρινές εγκαταστάσεις είναι δυνατό να διατηρηθούν
3	Μερικές καλά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις μπορεί να διατηρηθούν με κατάλληλη συντήρηση, αν δεν υπάρξει ξαφνική επιτάχυνση της κίνησης
2	Μερικές από τις μόνιμες κατασκευές παραμένουν ανέπαφες
1	Η μετακίνηση προσδιορίζεται μόνο με ενόργανες μετρήσεις. Οι κατασκευές δεν υφίστανται βλάβες, όταν λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Στην βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος εργασιών που αφορούν την εφαρμογή της Διαφορικής Συμβολομετρίας στον εντοπισμό και την καταγραφή μετακινήσεων εδάφους και κατολισθητικών φαινομένων. Σε προηγούμενες δεκαετίες χρησιμοποιούνταν κυρίως μεμονωμένα διαφορικά συμβολογραφήματα για τον εντοπισμό κατολισθήσεων. Ωστόσο, η παραπάνω τεχνική παρουσιάζει κάποιους σημαντικούς περιορισμούς (Parcharidis et al., 2009). Αρχικά, τα μεγάλα ανύσματα βάσης οδηγούν σε χαμηλή συσχέτιση λόγω της φασματικής μετατόπισης των στόχων. Το μεγάλο χρονικό διάστημα μεταξύ των λήψεων των απεικονίσεων οδηγεί σε χαμηλή συνάφεια των συμβολογραφημάτων. Επίσης παρατηρούνται προβλήματα στην εκτύλιξη φάσης (unwrapping) των συμβολογραφημάτων με μεγάλα ανύσματα βάσης. Τέλος, παρατηρούνται ατμοσφαιρικές επιδράσεις, λόγω των υδρατμών που υπάρχουν στην τροπόσφαιρα και της πυκνότητας των ηλεκτρονίων που υπάρχουν στην ιονόσφαιρα.

Οι παραπάνω παράγοντες καθιστούν αναποτελεσματική την συμβολομετρία στην μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων. Γι' αυτόν τον λόγο, με το πέρασμα των χρόνων αναπτύχθηκαν τεχνικές όπου εκμεταλλεύονται πλήθος διαφορικών συμβολογραφημάτων που προκύπτουν από ένα πλούσιο αρχείο λήψεων με μεγάλο χρονικό εύρος. Αυτές οι τεχνικές ονομάστηκαν τεχνικές Πολλαπλής Διαχρονικής Διαφορικής Συμβολομετρίας (Multi Temporal DInSAR – MTDInSAR ή MTI) (Colesanti et al., 2003; Colesanti & Wasowski, 2006; Farina et al., 2006; Hilley et al., 2004; Ferretti et al., 2007).

Οι τεχνικές Πολλαπλής Διαχρονικής Διαφορικής Συμβολομετρίας (MTI) έχουν αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια καθώς έχει δημιουργηθεί πλέον ένα πλούσιο αρχείο εικόνων SAR από διάφορους δέκτες, σε βάθος χρόνου και με σχεδόν παγκόσμια κάλυψη. Μ' αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα να μελετηθούν περιοχές σε όλη την υφήλιο, σε βάθος χρόνου (πάνω από 20 έτη περίπου).

Ταυτόχρονα, την τελευταία δεκαετία έχουν αναπτυχθεί και διάφορες τεχνικές επεξεργασίας των εικόνων SAR, με την ανάπτυξη πιο εξειδικευμένων διαδικασιών και αλγορίθμων (Hooper, 2008; Fornaro et al., 2009; Ferretti et al., 2011). Επιπροσθέτως, έχουν αναδυθεί και νέες προκλήσεις χάρη στη διαθεσιμότητα των δεδομένων, αλλά και στις πιο ανεπτυγμένες δυνατότητες των σύγχρονων δορυφορικών συστημάτων. Για παράδειγμα, οι δορυφόροι Cosmo-SkyMed και TerraSAR-X εκπέμπουν ακτινοβολία στο κανάλι X που συνεπάγεται διακριτική ικανότητα 3 έως 1 μέτρα. Παράλληλα, οι νέοι δορυφόροι (Sentinel 1 και 2) που έχουν και πιο μικρή περίοδο επανάληψης λήψεων (μικρότερο χρονικό άνυσμα βάσης) της τάξης των 11 έως 4 ημερών.

Γι' αυτόν τον λόγο έχει εγκαταλειφθεί η χρήση μεμονωμένων συμβολογραφημάτων πριν και μετά από ένα κατολισθητικό γεγονός, καθώς η μόνη πληροφορία που εξαγόταν ήταν για την γεωμετρία της ολισθαίνουσας μάζας. Με την εφαρμογή της Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας δίνεται η δυνατότητα να μετρηθεί και ο ρυθμός ολίσθησης σε συγκεκριμένα πρανή, αλλά και πως αυτός διαφοροποιείται σε βάθος χρόνου (π.χ. επιτάχυνση σε περιόδους βροχοπτώσεων ή μετά από σεισμικά γεγονότα, επιβράδυνση μετά τη λήψη μέτρων). Οπότε, προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα μπορεί να εξεταστεί η συσχέτιση των φαινομένων με τους διάφορους παράγοντες που επιδρούν στις κατολισθήσεις.

3.2 Μέθοδοι Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας (Multi Temporal Interferometry - MTI)

Η εφαρμογή της MTI βασίζεται στο γεγονός ότι με την χρήση πολλών διαφορεικών συμβολογραφημάτων αφαιρείται ο θόρυβος από την επίδραση της ατμόσφαιρας, ο οποίος παρουσιάζει συσχέτιση στο χρόνο, αλλά είναι ασυσχέτιστος στο χώρο. Δηλαδή, σε όλα τα διαφορεικά συμβολογραφήματα αναμένεται να υπάρχει θόρυβος εξαιτίας της ατμόσφαιρας, αλλά αυτός δεν είναι ίδιος όλα τα συμβολογραφήματα από διαφορετικά ζεύγη εικόνων για όλο το χρονικό διάστημα των λήψεων.

Η MTI έχει πολύ καλή εφαρμογή σε περιοχές μεγάλης έκτασης, όπου η παρακολούθηση των φαινομένων με επίγειους σταθμούς (GPS) είναι αδύνατο να εφαρμοστεί. Γι' αυτόν τον λόγο προτιμάται από τους μελετητές σε περιπτώσεις όπου εξετάζουν περιοχές μεγάλης κλίμακας (Colesanti et al., 2003; Colesanti and Wasowski, 2006). Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται και σε μικρότερες περιοχές, (κυρίως με την εφαρμογή της μεθόδου SBAS) παράγοντας αποτελέσματα με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα εξαγωγής χαρτών ταχύτητας της ετήσιας εδαφικής μετατόπισης για ένα διάστημα που μπορεί να φτάσει έως και τα 20 χρόνια. Επιπλέον παρέχει την δυνατότητα διερεύνησης των διακυμάνσεων της εδαφικής μετατόπισης με το χρόνο (χρονοσειρά), έτσι ώστε να είναι δυνατή η αναγνώριση τυχών μεταβολών του ρυθμού παραμόρφωσης, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την αντιμετώπισή τους (Colesanti et al. 2003, Ferretti et al. 2004, Parcharidis et al. 2009).

Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιοποίηση της τεχνικής Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας είναι η διαθεσιμότητα ενός πλήθους SAR απεικονίσεων, μεγάλου χρονικού διαστήματος, για μια περιοχή μελέτης. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι για μέσης χωρικής ανάλυσης δεδομένα SAR (ERS, ENVISAT) απαιτούνται τουλάχιστον 20 απεικονίσεις, ενώ όσο βελτιώνεται η ανάλυση ο αριθμός των απαιτούμενων εικόνων μπορεί να μειωθεί. (Colesanti et al., 2003, Hilley et al., 2004).

Πολλοί αλγόριθμοι (όπως αυτοί που εφαρμόζονται στην τεχνική SBAS) παράγουν αποτελέσματα με μέση ανάλυση (περίπου 80 μέτρα μέγεθος κελιού), που χρησιμοποιείται κυρίως για μελέτη και ανάλυση μεγάλων εκτάσεων. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή τέτοιων αποτελεσμάτων είναι οι μελέτες κατολισθήσεων περιφερειακής κλίμακας, όπου εντοπίζονται πολύ μεγάλες μετακινήσεις.

Μέσω της τεχνικής MTI αναγνωρίζονται και εντοπίζονται με μεγάλη ακρίβεια περιστροφικές και μεταθετικές κατολισθήσεις, καθώς επίσης και φαινόμενα ερπυσμού (Colesanti and Wasowski, 2006, Ferretti et al., 2007). Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι μπορεί να εντοπίσει μετακινήσεις με πολύ μικρή ταχύτητα, αλλά και γεγονότα με ραγδαία εξέλιξη, όπως μια βίαιη κατολίσθηση. Στην δεύτερη περίπτωση, με την εφαρμογή της απλής συμβολομετρίας ήταν δύσκολη η αναγνώριση του φαινομένου, καθώς τέτοια φαινόμενα επιφέρουν αποσυσχέτιση του σήματος.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι στις περισσότερες περιπτώσεις που εφαρμόζεται η τεχνική της Πολλαπλής Διαχρονικής Ανάλυσης, υπολογίζεται συνήθως η μέση ταχύτητα των μετατοπίσεων. Αυτό συνεπάγεται ότι, πολύ μικρές ταχύτητες, καθώς και πολύ μεγάλες, δεν μπορούν να εκτιμηθούν. Αποτέλεσμα είναι να υποεκτιμάται ή να υπερεκτιμάται, αντίστοιχα, η ταχύτητα μετατόπισης σε ορισμένες περιοχές (Delacourt et al., 2007).

Επιλογή φασματικών καναλιών L/C/X για MTI

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας (MTI), όπως το μήκος κύματος, ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών λήψεων και η χωρική ανάλυση. Οι Bovenga et al. (2012) δημιούργησαν ένα θεωρητικό μοντέλο το οποίο αξιολογεί την επίδραση των ραδιομετρικών και γεωμετρικών παραμέτρων στην ακρίβεια της MTI. Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μειώνεται ο θόρυβος του σήματος και αντίστοιχα η ανάλυση αυξάνεται. Αντίθετα, το μέγεθος του σφάλματος στην τελική εκτίμηση της ταχύτητας μετατόπισης εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων εικόνων, αλλά και από το χρονικό διάστημα των λήψεων.

Επιπλέον οι Duro et al. (2012) παρουσιάζουν μια συγκριτική μελέτη αποτελεσμάτων MTI από δεδομένα με διαφορετικό μήκος κύματος (L, C και X). Από την μελέτη τους προέκυψε ότι με μικρότερο μήκος κύματος, οι μετρούμενες ταχύτητες μειώνονται, αλλά ταυτόχρονα, η ευαισθησία μέτρησης στις μετακινήσεις κατά μήκος του LOS αυξάνεται, όπως και η ικανότητα να μετρηθούν πολλοί μικροί ρυθμοί ολίσθησης. Παρόλα αυτά η δυνατότητες της μπάντας C αναμένεται να βελτιωθούν χάρη στον καινούργιο δορυφόρο Sentinel-1 της ESA, ο οποίος ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της συμβολομετρίας (Rucci et al., 2012).

Σημείο Αναφοράς

Μια σχετική ιδιαιτερότητα της ΠΔΑ (MTI) είναι το γεγονός ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της συμβολομετρικής φάσης, η οποία διατηρεί την συνάφειά της, τόσο στον χρόνο, όσο και στον χώρο. Πριν την μετατροπή της διαφορικής φάσης σε πραγματικές τιμές μετατόπισης, πρέπει να οριστεί ένα σημείο αναφοράς (reference point) το οποίο είναι σταθερό, τόσο στον χρόνο, όσο και στον χώρο. Συνήθως επιλέγεται ένα σημείο στην κύρια εικόνα SAR (master image), το οποίο θεωρείται αμετάβλητο, βάσει γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών ή ακόμα και μέσω μετρήσεων GPS. Φυσικά το σημείο αυτό δεν πρέπει να εμπίπτει σε περιοχές που παρουσιάζουν φαινόμενα γεωμετρικής παραμόρφωσης (σμίκρυνση, αναστροφή, σκίαση), ενώ είναι προτιμητέο να επιλέγονται σημεία που διατηρούν υψηλή συνάφεια σε βάθος χρόνου.

Επιπλέον, εάν το σημείο αναφοράς επηρεάζεται από περιοδικές μετακινήσεις, όπως για παράδειγμα, λόγω θερμικής διαστολής, αυτές οι ταλαντώσεις μπορεί να συμπεριληφθούν στην συνολική μετατόπιση των χρονοσειρών (Notti et al., 2012). Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως περιοχές με υψηλό ποσοστό τεκτονικών παραμορφώσεων, σταθερά σημεία αναφοράς μπορεί να μην είναι διαθέσιμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ανάλυση χρονοσειρών μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός σημείου αναφοράς του οποίου η τρισδιάστατη κίνηση είναι γνωστή. Τέλος, σε ορισμένες έρευνες περιφερειακής κλίμακας ενδέχεται να απαιτούνται περισσότερα του ενός σημεία αναφοράς.

Τέλος, καλό είναι να αποφεύγονται σημεία σε αστικά και δομημένα περιβάλλοντα, καθώς έχει αποδειχθεί ότι παρουσιάζουν φαινόμενα καθίζησης μικρής ταχύτητας. Ιδιαίτερα οικοδομήματα άνω των 15 ετών εμφανίζουν μικρές καθιζήσεις λόγω της συμπαγοποίησης του υποκείμενου εδάφους από το βάρος του κτιρίου.

Γεωμετρικές παραμορφώσεις

Η εφαρμογή των τεχνικών της διαφορικής συμβολομετρίας στην μελέτη κατολισθήσεων είναι περίπλοκη εξαιτίας των γεωμετρικών παραμορφώσεων που οφείλονται στην γεωμετρία λήψης του δορυφόρου (γωνία λήψης).

Στις περιοχές που επηρεάζονται είτε από σμίκρυνση, είτε από αναστροφή, το οπισθοσκεδαζόμενο σήμα είναι άχρηστο και συνεπώς η ορατότητα των παραπάνω περιοχών εξαρτάται αποκλειστικά από την κλίση και τον προσανατολισμό των πρανών σε σχέση με την γραμμή θέασης του δορυφόρου (LOS) (Hanssen, 2001). Μια συνήθης πρακτική που ακολουθείται είναι η δημιουργία ενός χάρτη ορατότητας από το ραντάρ, βάσει του DEM της περιοχής και γνωρίζοντας την γωνία θέασης του δορυφόρου (Cascini et al., 2009, Notti et al., 2010).

Εντοπισμός μετακινήσεων

Όσον αφορά την εδαφική παραμόρφωση, μέσω των τεχνικών της διαφορικής συμβολομετρίας υπολογίζεται μόνο η συνιστώσα της μετατόπισης που είναι παράλληλη στην γραμμική θέασης του δορυφόρου (LOS). Η πλήρης μετατόπιση στις τρεις διαστάσεις μπορεί μόνο να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τουλάχιστον τρία διαφορετικά και ανεξάρτητα σετ συμβολομετρικών δεδομένων (με διαφορετικές γεωμετρίες λήψης). Όμως, οι δορυφόροι SAR λειτουργούν σε σχεδόν πολικές τροχιές (ανοδική και καθοδική), παρέχοντας κυρίως δύο ανεξάρτητες συμβολομετρικές μετρήσεις, με τις δύο αντίθετες διευθύνσεις λήψεων (Hanssen, 2001).

Γενικά, οι εικόνες καθοδικής και ανοδικής τροχιάς προτιμώνται για κλίσεις με δυτικό και ανατολικό προσανατολισμό, αντίστοιχα. Ιδιαίτερα όταν είναι διαθέσιμες εικόνες και από τις δύο τροχιές περιορίζονται οι περιοχές που υπόκεινται σε σμίκρυνση, αναστροφή και σκίαση.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μια SAR απεικόνιση αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο διεύθυνσης B-N, όπου εντοπίζονται μετακινήσεις σε πρηνή με προσανατολισμό κυρίως A ή Δ, αδυνατώντας να παρατηρηθούν παραμορφώσεις στην διεύθυνση του αξιμούθιου (σχεδόν B-N). Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο, σε ορισμένες περιστροφικές κατολισθήσεις δεν μπορεί να μετρηθεί και η πλευρική (οριζόντια) μετατόπιση φοράς B – N και μετράται μόνο η κατακόρυφη κίνηση κατά μήκος του LOS (Cascini et al., 2010). Ωστόσο, από το συνδυασμό των λήψεων των δύο τροχιών μπορούν να εκτιμηθούν με ακρίβεια όλες οι συνιστώσες των μετακινήσεων (οριζόντια και κάθετη).

Τέλος, μέσω των σύγχρονων δορυφόρων υψηλής ανάλυσης είναι εφικτή η μέτρηση μετατοπίσεων στην διεύθυνση του αξιμούθιου (σχεδόν B-N), μέσω της συσχέτισης της έντασης του σήματος (amplitude) ή μέσω της ποικιλομορφίας του φάσματος. Τα αποτελέσματα, ωστόσο, χαρακτηρίζονται από χαμηλή ακρίβεια (Bovenga et al., 2013).

Ακρίβεια μετρήσεων

Οι μικρομετακινήσεις που δύναται να εντοπιστούν καθορίζονται από το μέγεθος και την χωρική έκταση του παραμορφωτικού φαινομένου, αλλά και από φυσικούς περιορισμούς του ίδιου του συστήματος SAR.

Δεδομένου ότι μετράται η σχετική διαφορά φάσης και η τελευταία λαμβάνει τιμή στο διάστημα $\pm\pi$, υπάρχει ένα ανώτερο όριο μεταβολής πέραν του οποίου δεν είναι εφικτή η παρατήρηση. Διαφορά φάσης μεγαλύτερη από π ακτίνια ($\Delta\tau = 1/4$) μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων στο διαφορικό συμβολογράφημα, θα οδηγούσε σε ασάφεια. Το παραπάνω όριο αντιστοιχεί περίπου σε μεταβολή ίση με 10^{-3} στην διεύθυνση LOS της απεικόνισης για συστήματα SAR στο φασματικό κανάλι C (όπως των δορυφόρων ERS και ENVISAT). Αντίθετα, αν η σχετική μετακίνηση σε ένα

διαφορικό συμβολογράφημα είναι μικρότερη από περίπου 10^{-7} (1 cm ανά 100Km), τότε είναι δυσχερής η διάκριση της παραμόρφωσης από σφάλματα των τροχιακών δεδομένων ή από μεγάλου μήκους κύματος ατμοσφαιρικές παρεμβολές.

Από την βιβλιογραφία προκύπτει ότι μέσω της MTI η ακρίβεια που επιτυγχάνεται είναι της τάξης των 5 mm περίπου για μεμονωμένη μετακίνηση και περίπου 1 χιλιοστό το χρόνο (1mm/yr) ως μέσος ρυθμός ολίσθησης (Casu et al., 2006; Ferretti et al., 2007; Bovenga et al., 2013). Παρόλα αυτά, η ποιότητα των μετρήσεων εξαρτάται και από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και την χρονική κατανομή των εικόνων SAR. Γενικά η ακρίβεια των μετρήσεων είναι χαμηλή στις περιπτώσεις με υψηλή φυτοκάλυψη, όπου μειώνεται η συνάφεια.

Επίσης η ακρίβεια μειώνεται στις περιοχές με έντονο ανάγλυφο, το οποίο εκτός των γεωμετρικών παραμορφώσεων που δημιουργεί, επιφέρει και αύξηση του θορύβου λόγω της ατμόσφαιρας. Στην ιδανική περίπτωση, ο κύριος παράγοντας που επιφέρει μείωση της ακρίβειας είναι το χαμηλής συχνότητας σήμα, από την ατμόσφαιρα και τα σφάλματα στα τροχιακά δεδομένα (Rucci et al., 2012). Γενικά, για καλύτερης ποιότητας αποτελέσματα απαιτείται μεγάλος αριθμός εικόνων, ομοιογενής χρονική κατανομή των εικόνων και μεγαλύτερο χρονικό εύρος μελέτης.

Οι κυριότερες τεχνικές Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας που αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες και εφαρμόζονται κατά κόρων από τους ερευνητές, είναι οι ακόλουθες.

3.3 Τεχνική Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων (Interferogram Stacking)

Η τεχνική της Σώρευσης (Stacking) Διαφορικών Συμβολογραφημάτων που στηρίζεται στον υπολογισμό του μέσου όρου της φάσης από ένα σύνολο ανεξάρτητων συμβολογραφημάτων στην χρονική διάσταση, με σκοπό τον περιορισμό ασυσχέτιστων χρονικών διακυμάνσεων της φάσης (Hanssen, 2001, Ewardson et al., 2003).

Η σώρευση συμβολογραφημάτων προσφέρει το πλεονέκτημα της μείωσης του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio – SNR), το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην καταγραφή φαινομένων με μεγάλη ταχύτητα παραμόρφωσης, (σε όρους InSAR μεταφράζεται ότι συμβαίνουν μεταξύ δύο διαδοχικών λήψεων - συνήθως μεμονωμένα γεγονότα), ή φαινομένων με σταθερό ρυθμό εξέλιξης.

Βασική αρχή της τεχνικής Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων είναι η υψηλή συσχέτιση του μέρους της φάσης που αφορά συνεχή παραμορφωτικά φαινόμενα, έναντι των όρων σφάλματος της φάσης (ατμοσφαιρική καθυστέρηση, θόρυβος κλπ.), που αποτελούν ουσιαστικά ασυσχέτιστες ποσότητες μεταξύ των επί μέρους συμβολογραφημάτων. Το παραπάνω προσφέρει το πλεονέκτημα εντοπισμού

μικρής ισχύος σήματος, που σε διαφορετική περίπτωση θα χάνονταν μέσα στο θόρυβο του σήματος (Simons and Rosen, 2015).

Καθώς λοιπόν το πραγματικό μέρος του σήματος αθροίζεται γραμμικά, οι όροι σφάλματος αυξάνονται με αρκετά χαμηλότερους ρυθμούς λόγω του ασυσχέτιστου χαρακτήρα τους, με αποτέλεσμα την μειωμένη επίδρασή τους στο σωρευμένο διαφορικό συμβολογράφημα.

Συνδυάζοντας ικανοποιητικό αριθμό παρατηρήσεων, περιορίζονται σημαντικά οι όροι εισαγωγής σφάλματος, και είναι πλέον εφικτή η επίτευξη ακριβειών της τάξεως των μερικών χιλιοστών ανά έτος, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής συνάφειας, όπως εκείνα των αστικών περιοχών (Tosi et al., 2002).

Ένα σωρευμένο διαφορικό συμβολογράφημα μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες του ραντάρ (azimuth, range), επιλέγοντας ένα συμβολογράφημα σαν κύριο, είτε σε πραγματικές συντεταγμένες (φ,λ). Πριν την εφαρμογή της μεθόδου όμως, απαιτείται η επιλογή των κατάλληλων διαφορικών συμβολογραφημάτων. Προϋπόθεση αποτελεί η διαθεσιμότητα κατάλληλων διαφορικών συμβολογραφημάτων με μεγάλο σχετικά χρονικό εύρος παρατήρησης και περιορισμένα μήκη εγκάρσιων ανυσμάτων βάσης. Πρέπει να τονιστεί ότι η χωρική κάλυψη των αποτελεσμάτων καθορίζεται από εκείνη του συνόλου των επί μέρους συμβολογραφημάτων (Simons and Rosen, 2015).

Η πιο απλή και συνήθης πρακτική είναι το απλό άθροισμα του συνόλου των συμβολογραφημάτων και ο υπολογισμός του μέσου όρου. Σε αυτήν την περίπτωση περιοχές που εμφανίζουν αποσυσχέτιση, αποτελούν το άθροισμα ασυσχέτιστων περιοχών των επί μέρους συμβολογραφημάτων. Γι' αυτόν τον λόγο πολλές φορές αποκλείονται από τον υπολογισμό συμβολογραφήματα που εμφανίζονται μεγάλες εκτάσεις με αποσυσχέτιση (χαμηλή συνάφεια).

Ωστόσο, στην βιβλιογραφία αναφέρεται και η εφαρμογή του αθροίσματος με σταθμισμένα συμβολογραφήματα. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η φάση του έκαστου διαφορικού συμβολογραφήματος σταθμίζεται (weighted) σύμφωνα με την εξεταζόμενη διάρκεια της παρατήρησης. Συνήθως δημιουργείται ένας πίνακας βαρών, όπου τα βάρη αντιστοιχούν στην αντίστροφη διακύμανση των παρατηρήσεων. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η δυνατότητα αξιοποίησης όλων των συμβολογραφημάτων, καθώς γραφήματα με χαμηλή συνάφεια λαμβάνουν μικρό βάρος.

Βασικό μειονέκτημα της σώρευσης συμβολογραφημάτων είναι η αδυναμία αναγνώρισης μεταβολών της γραμμικής ταχύτητας μετακίνησης. Επίσης για τον υπολογισμό του σωρευμένου συμβολογραφήματος απαιτείται η εκτύλιξης της φάσης των χρησιμοποιούμενων διαφορικών συμβολογραφημάτων, γεγονός που δεν πραγματοποιείται πάντα με επιτυχία. Η καταλληλότητα επομένως της τεχνικής αφορά την παρακολούθηση φαινομένων όπου η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα με σχετικά

σταθερούς ρυθμούς, ώστε να έχει πρακτική αξία η εκτίμηση ενός μέσου ρυθμού μεταβολής στο επιλεγμένο χρονικό διάστημα παρατήρησης.

3.4 Τεχνική Συμβολομετρίας Σταθερών Ανακλαστήρων (Permanent Scatterers DInSAR)

Τα τελευταία χρόνια, η επιστημονική κοινότητα επικεντρώνεται στην ανάλυση χρονοσειρών διαφορικών παρατηρήσεων DInSAR, μέσω των διαφόρων τεχνικών Συμβολομετρίας Σταθερών Ανακλαστήρων (Permanent Scatterers ή αλλιώς Persistent Scatterers Interferometric techniques) (Ferretti et al., 2000, Berardino et al., 2002, Werner et al., 2003, Colesanti & Wasowski, 2006, Ferretti et al., 2007, Hooper et al., 2008).

Η τεχνική των σταθερών ανακλαστήρων (Permanent Scatterers ή PS) αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 2000 από μια ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου του Μιλάνο (POLIMI) (Ferretti et al., 2000 & 2007). Ο βασικός στόχος της ανάπτυξης της συγκεκριμένης τεχνικής ήταν να ξεπεράσει τους περιορισμούς της χρονικής και χωρικής αποσυσχέτισης της συμβολομετρίας Ραντάρ (InSAR). Ταυτόχρονα, αυτή η νέα τεχνική αντιμετωπίζει επιτυχώς προβλήματα όπως οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις, οι οποίες μπορούν να μετριάσουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία και ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Ferretti et al., 2000 & 2007, Zhao et al., 2009).

Η τεχνική χρησιμοποιεί ένα πλούσιο αρχείο δορυφορικών εικόνων Ραντάρ (με εκκίνηση το 1992) με σκοπό να αναγνωρίσει δίκτυα από επιφανειακά χαρακτηριστικά τα οποία σκεδιάζουν σταθερά το σήμα του Ραντάρ στο σύνολο όλων των εικόνων. Οι σταθεροί ανακλαστήρες αντιστοιχούν κυρίως σε χαρακτηριστικά τα οποία έχουν κατασκευαστεί από τον ανθρώπινο παράγοντα όπως κτίρια, γέφυρες, φράγματα, υδάτινοι αγωγοί, κεραίες κτλ., καθώς επίσης και σε φυσικούς ανακλαστήρες όπως πετρώματα.

Με άλλα λόγια, οι σταθεροί ανακλαστήρες συνθέτουν ένα “φυσικό γεωδαιτικό δίκτυο” με σκοπό την παρατήρηση της παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας με ακρίβεια χιλιοστού (αφορά κυρίως στην γραμμική παραμόρφωση), καθώς επίσης και της σταθερότητας των μεμονωμένων κατασκευών. Επιπλέον, να σημειωθεί ότι οι σταθεροί ανακλαστήρες είναι χαρακτηριστικά της γήινης επιφάνειας τα οποία διατηρούν πάντα την ίδια συμπεριφορά στις εικόνες ραντάρ που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικά λήψεις.

Η τεχνική των Σταθερών Ανακλαστήρων εφαρμόζεται με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις που αφορούν την επιλογή των υποψήφιων σημείων προς ανάλυση και επεξεργασία. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται στα φασματικά χαρακτηριστικά της κάθε εικόνας SLC. Αυτό επιτυγχάνεται με την ταυτοποίηση ανακλαστήρων, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από χαμηλή φασματική πολυμορφία στη φάση (low spectral phase diversity). Ενώ, η δεύτερη μέθοδος, βασίζεται στην ταυτοποίηση των ανακλαστήρων, η οποία βασίζεται στην χαμηλή μεταβλητότητα της έντασης της ακτινοβολίας.

3.5 Τεχνική Μικρού Ανύσματος Βάσης (Small Baseline Subset – SBAS)

Η τεχνική μικρού ανύσματος βάσης βασίζεται στον συνδυασμό διαφορικών συμβολογραφημάτων που παρήχθησαν χρησιμοποιώντας ένα σετ πρωτογενών δεδομένων (μηδενικής επεξεργασίας) εικόνων ραντάρ, που έχουν ληφθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (Berardino et al., 2002; Mora et al., 2003; Usai, 2003). Κύρια προϋπόθεση της μεθόδου είναι η επιλογή ζεύγους εικόνων SAR, οι οποίες να έχουν μικρό άνυσμα βάσης. Το μικρό άνυσμα βάσης συνεπάγεται την ελαχιστοποίηση του θορύβου που σχετίζεται με την αποσυσχέτιση και την αύξηση της συνάφειας μεταξύ των εικόνων (ESA, 2015). Στην πραγματικότητα η μέθοδος προϋποθέτει το μικρό άνυσμα βάσης (perpendicular baseline), τη μικρή χρονική διαφορά λήψης των εικόνων (temporal baseline) και την μικρή μετατόπιση της συχνότητας Doppler μεταξύ των δύο εικόνων που παράγουν ένα συμβολογράφημα (Guzzetti et al. 2009).

Αρχικά η τεχνική SBAS σχεδιάστηκε για την διερεύνηση εδαφικών παραμορφώσεων που εκτείνονται σε πολύ μεγάλες εκτάσεις (από μερικές εκατοντάδες σε αρκετές χιλιάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα). Τα αποτελέσματα ήταν διακριτικής ικανότητας 80 μέτρων και ήταν κατάλληλα για την μελέτη ηφαιστειακής δραστηριότητας, ενεργού τεκτονικής, καθιζήσεων και μικρής ταχύτητας εδαφικών μετακινήσεων (Berardino et al., 2002, Guzzetti et al. 2009).

Πρόσφατα η τεχνική τροποποιήθηκε για τον εντοπισμό και την μέτρηση της παραμόρφωσης συγκεκριμένων σημείων – στόχων, όπως για παράδειγμα μεμονωμένα κτίρια ή κτιριακά συγκροτήματα. Η τροποποιημένη μέθοδος SBAS χρησιμοποιεί δύο σετ διαφορικών συμβολογραφημάτων με χαμηλή και υψηλή χωρική ανάλυση, αντίστοιχα. Μέσω των σετ συμβολογραφημάτων χαμηλής ανάλυσης αξιοποιούνται οι χαμηλής συχνότητας συνιστώσες του σήματος της παραμόρφωσης. Εντοπίζονται έτσι, μεγάλης έκτασης μοτίβα που έχουν χωρική συσχέτιση, αλλά και πιθανός θόρυβος από την επίδραση της ατμόσφαιρας (με εξίσου χωρική συσχέτιση). Αντίθετα, η υψηλή ανάλυση χρησιμοποιείται για να εστιάσει σε περιοχές ενδιαφέροντος, επιτρέποντας την διερεύνηση τοπικών παραμορφώσεων που συνδέονται με τις υψηλής συχνότητας συνιστώσες του σήματος της παραμόρφωσης (Guzzetti et al. 2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

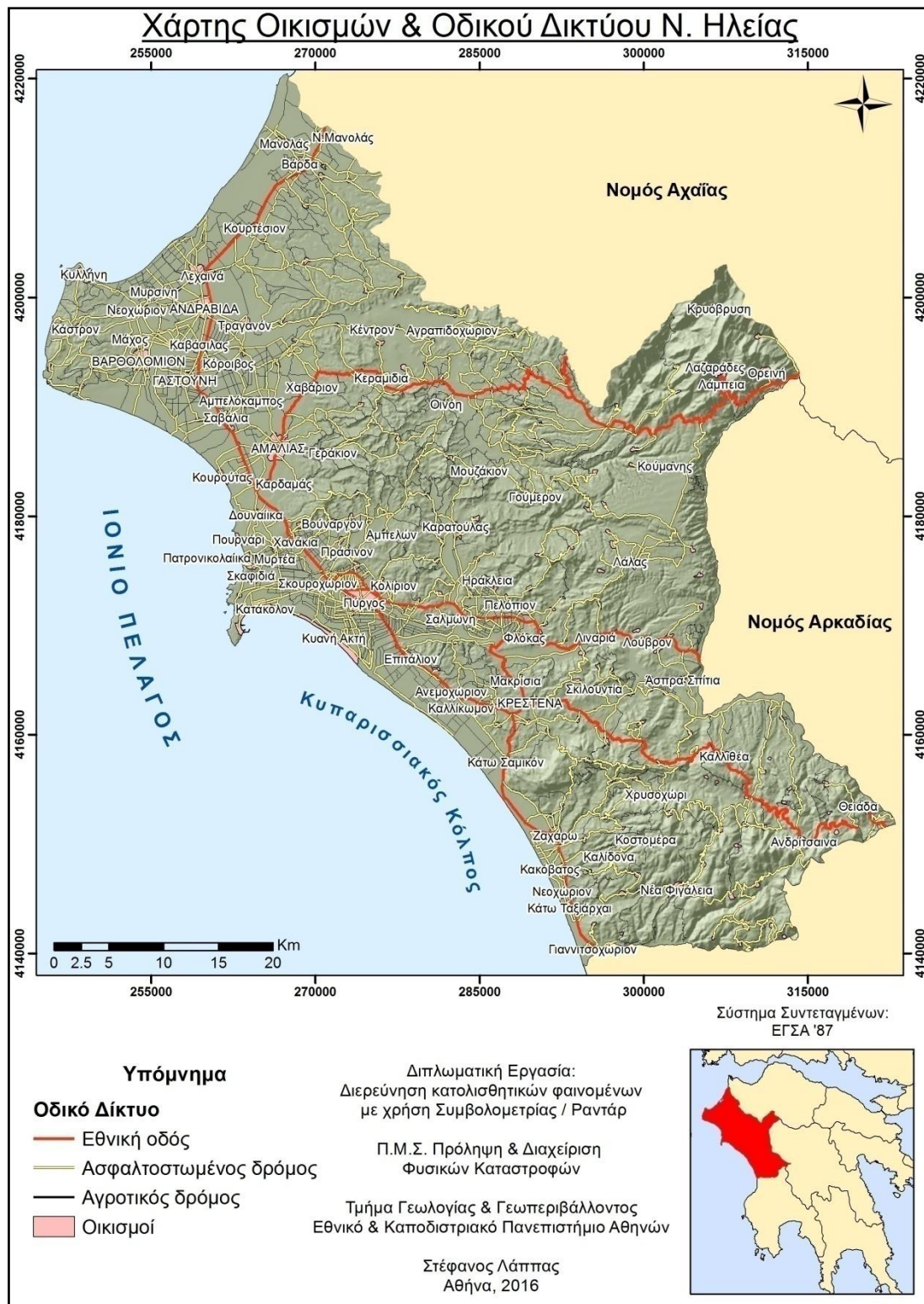
4.1 Ανθρωπογεωγραφικά Χαρακτηριστικά

Ο Νομός Ηλείας συνορεύει ΒΒΑ με τον Νομό Αχαΐας, ανατολικά με τον Νομό Αρκαδίας, νότια με τον Νομό Μεσσηνίας και δυτικά βρέχεται από το Ιόνιο Πέλαγος. Ο νομός Ηλείας υπάγεται στην Περιφέρεια της Δυτικής Ελλάδας, έχει έκταση 2.618 km² με πληθυσμό 193.429 κατοίκους και με μέση πυκνότητα πληθυσμού 74 κάτοικοι km². Η αγροτική έκταση του Νομού είναι 2,30 km² με αγροτικό πληθυσμό 111,288 κατοίκους, ενώ η αστική έκταση ανέρχεται στα 317 km² με αστικό πληθυσμό 82,141 κατοίκους. Ο πληθυσμός στη τελευταία απογραφή καταγράφηκε σε ποσοστό 58% ως αγροτικός, 24,8% ως αστικός και 18,3% ως ημιαστικός και από γεωγραφικής κατανομής η υψηλότερη συγκέντρωση παρατηρείται στα αστικά κέντρα και τα πεδινά.

Πρωτεύουσα του Νομού αποτελεί ο Πύργος με πληθυσμό 23.000 κατοίκους, ανήκει στον μεγαλύτερο δήμο με πληθυσμό 35.000 κατοίκους σε έκταση 170,8 km². Τα σημαντικότερα αστικά κέντρα του Νομού Ηλείας είναι τα ακόλουθα: η Αμαλιάδα με πληθυσμό 20.000 κατοίκους και έκταση 251,9 km² και πληθυσμό 32.000 κατοίκους, τα Κρέστενα με πληθυσμό 15.931 κατοίκους και έκταση 194 km², η Ζαχάρω με πληθυσμό 12.910 και έκταση 187 km², η Γαστούνη έκτασης 59 km² και ο πληθυσμός του ανέρχεται στους 11.532 κατοίκους. Στο Νομό Ηλείας ανήκουν και οι αρχαιολογικοί χώροι της Αρχαίας Ολυμπίας με έκταση 4 km² και Ήλιδας με έκταση 6 km².

Η μορφολογία του εδάφους προσδιορίζεται από πεδινές εκτάσεις που σχηματίζουν την πεδιάδα της Ηλείας, η οποία είναι η μεγαλύτερη της Πελοποννήσου, επίσης τις πεδιάδες της Αμαλιάδας, Λεχαινών, Μανωλάδας και Ολυμπίας. Οι σημαντικότεροι ορεινοί όγκοι βρίσκονται στα δυτικά του νομού με υψηλότερη κορυφή τη Λαμπεία (1.797 μ.), ακολουθούν η Μίνθη (1.345 μ), η Φολόη (780 μ) και ο Λάπιθας (773μ). Σύμφωνα με τη ΕΣΥΕ, 2,301 km² αποτελούν αγροτική έκταση, 316 km² είναι αστική έκταση, ενώ 1,516 km² είναι πεδινά, 554 km² είναι ημιορεινά και 546 km² ορεινά ανάγλυφα.

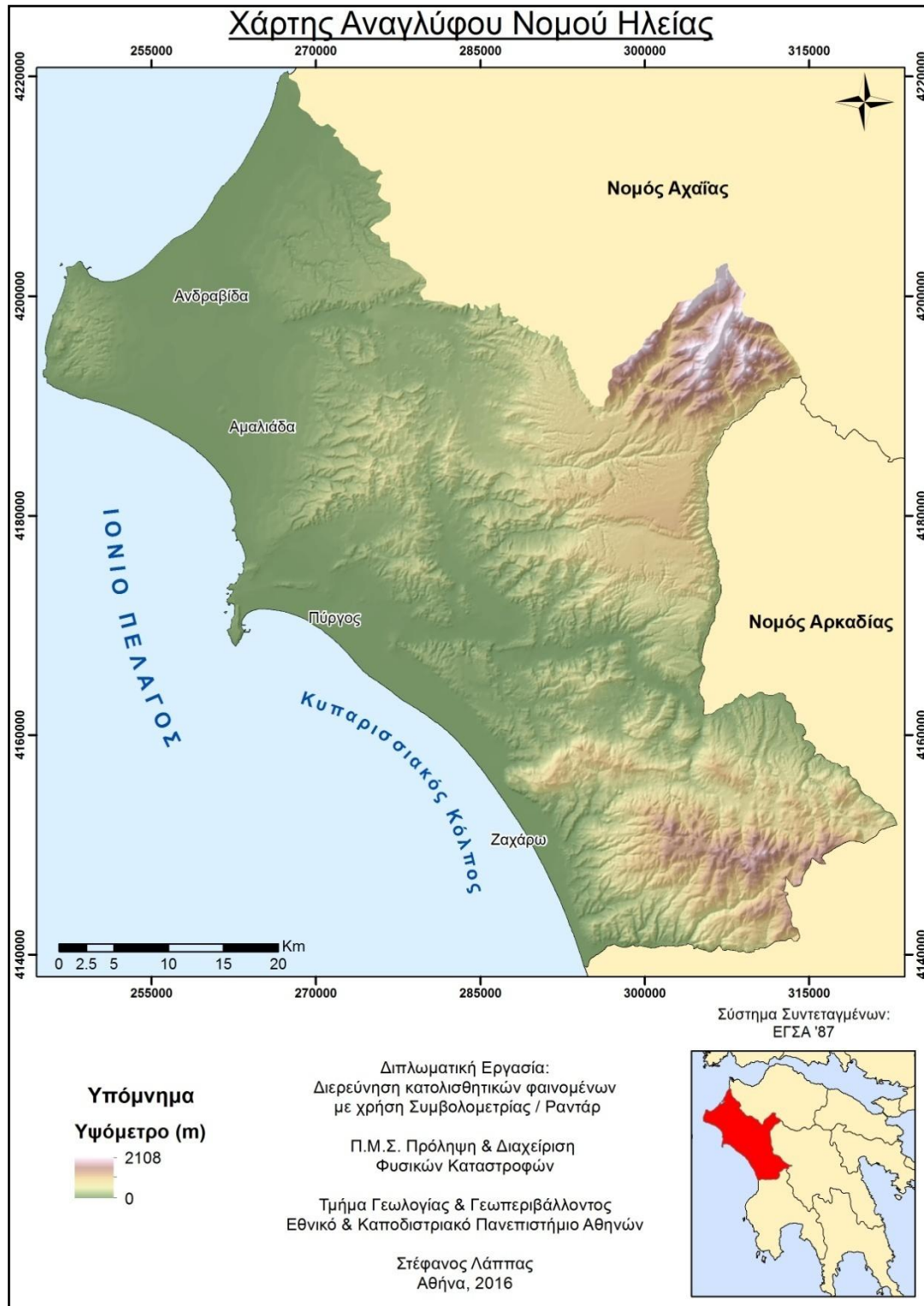
Το υδρογραφικό δίκτυο αποτελείται κυρίως από τους ποταμούς Αλφειό και Πηνειό, καθώς και από τους ποταμούς Νέδα και Λάδωνα. Η έκταση της λεκάνης απορροής του ποταμού Αλφείου είναι 3,600 km² και το συνολικό μήκος του ανέρχεται σε 110 km, ενώ πηγάζει από το όρος Πάρνωνα. Ο Αλφειός και ο Πηνειός αξιοποιούνται κυρίως στη άρδευση των γεωργικών εκτάσεων.



Χάρτης 4.1: Οικισμοί και οδικό δίκτυο Νομού Ηλείας

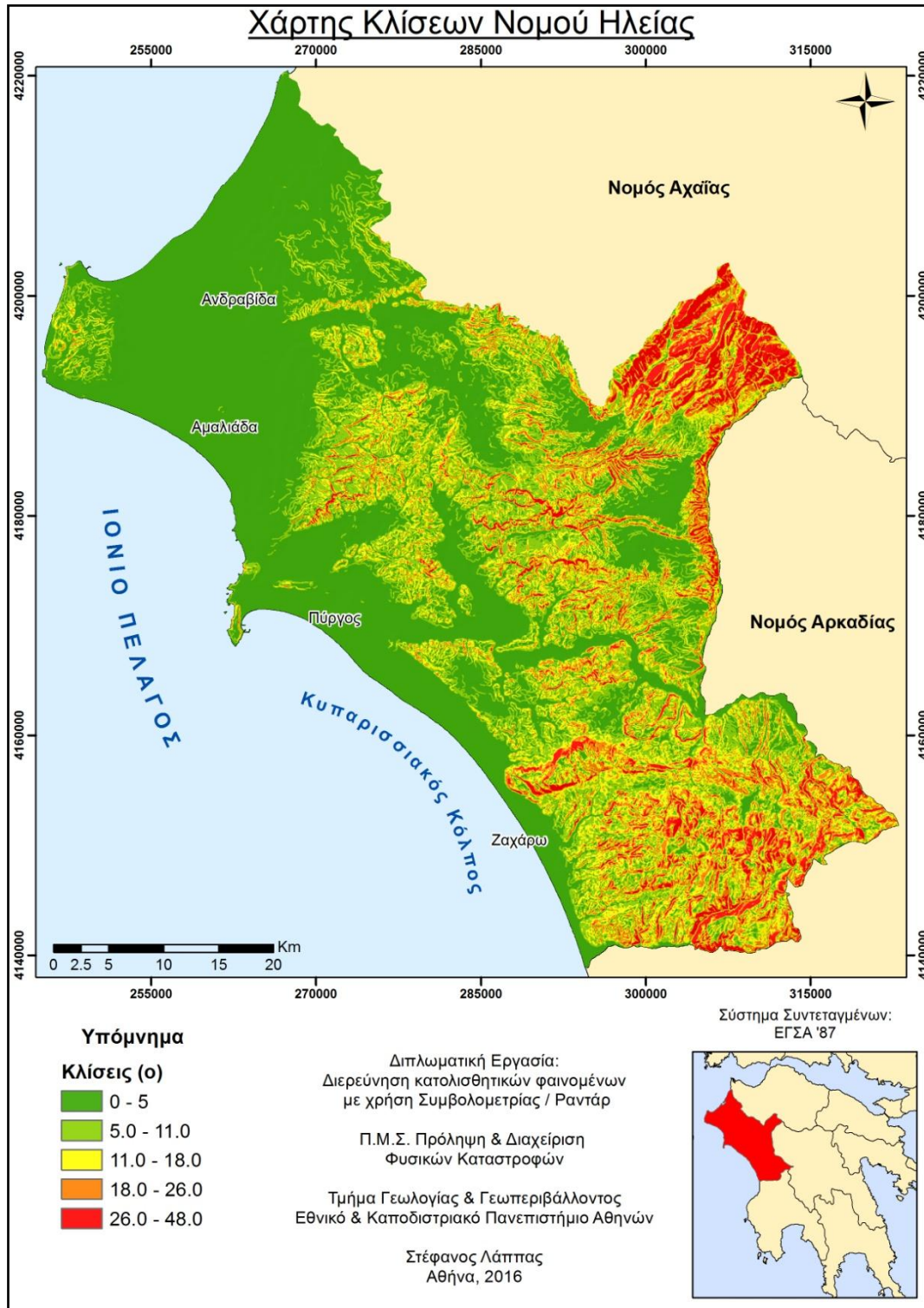
Οι οικονομικές δραστηριότητες οι οποίες αναπτύσσονται στον νομό σε μεγαλύτερο ποσοστό αφορούν τον πρωτογενή τομέα και στηρίζονται στις καλλιέργειες των δημητριακών, του ρυζιού, του βαμβακιού, της σταφίδας, των εσπεριδοειδών, της ελιάς, των κηπευτικών και λαχανικών.

Σημαντικό εισόδημα προσφέρει και η παραγωγή του ελαιολάδου, η κτηνοτροφία, η αλιεία καθώς και οι επεξεργασίες των αγροτικών προϊόντων. Επιπλέον είναι αναπτυγμένος και ο τριτογενής τομέας με τις υπηρεσίες του τουρισμού, χάρη του φυσικού κάλλους (ακρογιαλιές, ιαματικές πηγές, λίμνες, ποτάμια) και της αρχαιολογικής σημασίας (οι χώροι της Ολυμπίας και Ήλιδας) του νομού.



Χάρτης 4.2: Ανάγλυφο περιοχής μελέτης

Στο υδρολογικό δίκτυο του Νομού Ηλείας συμβάλλουν η λίμνη του Καϊάφα, η τεχνητή λίμνη του Πηνειού καθώς και η λιμνοθάλασσα Κοτύχι. Η λιμνοθάλασσα αποτελεί σημαντικό υδροβιότοπο, ο οποίος φιλοξενεί πολλά είδη πανίδας και χλωρίδας με αποτέλεσμα να προστατεύεται από την συνθήκη Ramsar. Παλιότερα υπήρχαν και οι λίμνες Μουργιά και Αγουλινίτσα οι οποίες αποξηράνθηκαν και έχουν μετατραπεί σε καλλιέργειες και αεροδρόμιο αντίστοιχα.

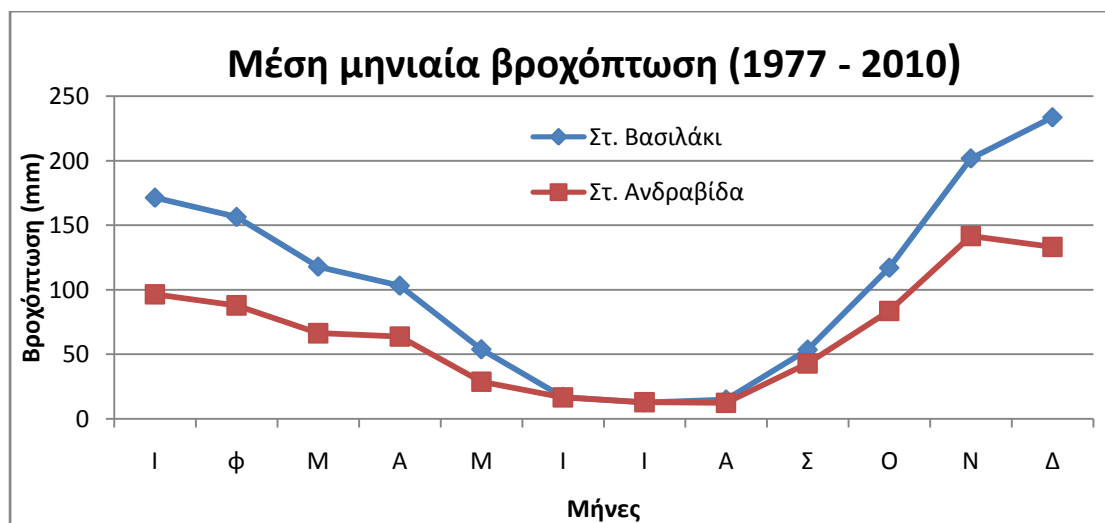


Χάρτης 4.3: Τοπογραφικές κλίσεις νομού Ηλείας.

4.2 Μετεωρολογικά Χαρακτηριστικά

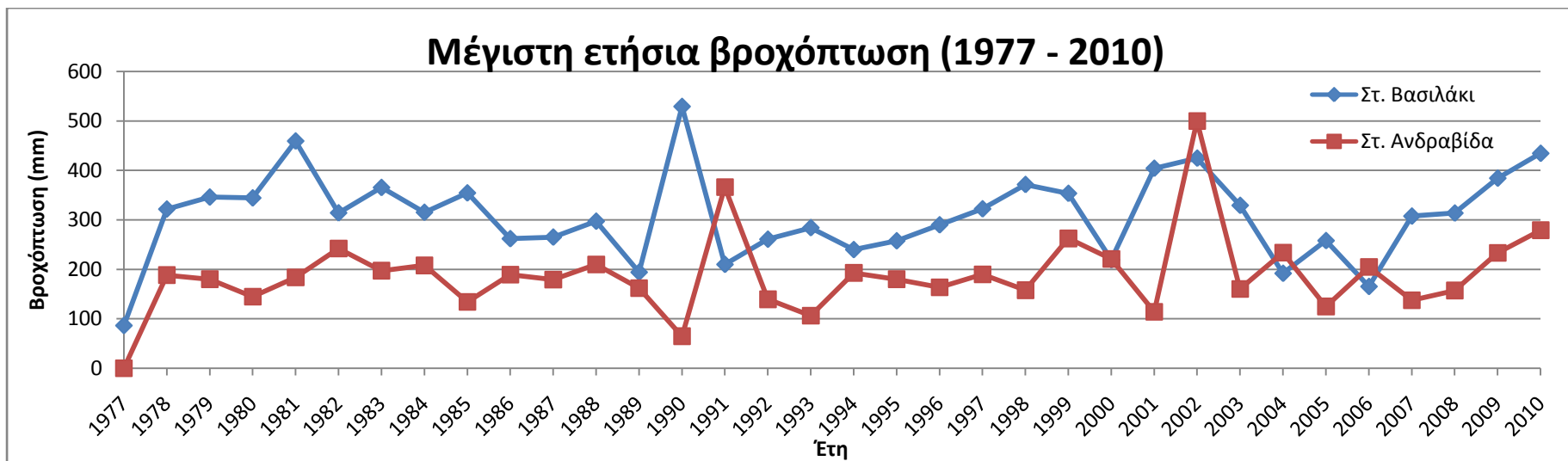
Το κλίμα στη περιοχή χαρακτηρίζεται από ήπιους χειμώνες, άφθονες βροχοπτώσεις, σχετικά μικρή νέφωση και μεγάλη ηλιοφάνεια. Η μείωση των βροχοπτώσεων και των χιονοπτώσεων στα ορεινά, τα τελευταία χρόνια, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των αποθεμάτων νερού στα φράγματα, τα οποία χρησιμοποιούνται μόνο για άρδευση, και τον μη εμπλουτισμό με τις απαραίτητες ποσότητες για την συντήρηση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Τα απαραίτητα μετεωρολογικά στοιχεία που αφορούν την περιοχή μελέτης προέρχονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς (ΜΣ) της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) στην Ανδραβίδα και στο Βασιλάκι. Ο πρώτος σταθμός βρίσκεται στο αεροδρόμιο της Πολεμικής Αεροπορίας σε υψόμετρο 10 μέτρων, ενώ ο σταθμός στο Βασιλάκι βρίσκεται στο ομώνυμο χωριό στην ανατολική Ηλεία σε υψόμετρο 250 μέτρων. Οι μετρήσεις βροχόπτωσης καλύπτουν τα έτη 1977 - 2010. Οι σταθμοί αυτοί έχουν επιλεγεί επειδή χαρακτηρίζονται από πληρότητα στοιχείων για την προαναφερόμενη χρονική περίοδο και το γεγονός ότι σε αυτούς μετρώνται με αξιοπιστία σχεδόν όλες οι κλιματολογικές παράμετροι. Επιπλέον η διασπορά τους είναι τέτοια που επιτρέπει την προκαταρκτική προσέγγιση και το χαρακτηρισμό του κλίματος.

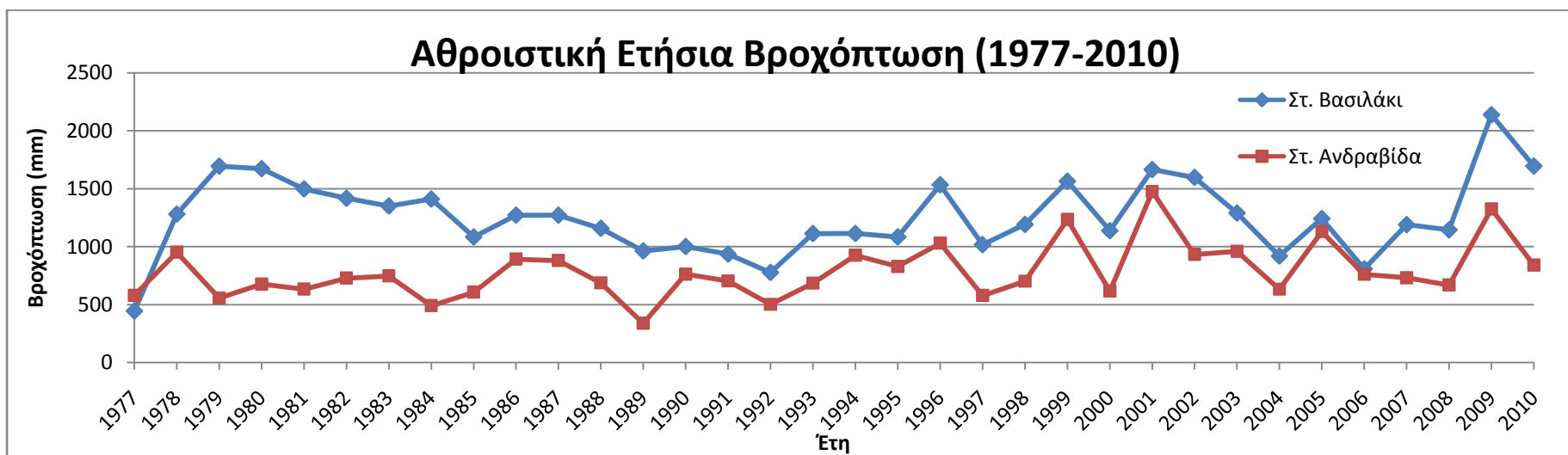


Διάγραμμα 4.1: Μέση μηνιαία βροχόπτωση περιόδου 1977 – 2010.

Από την εξέταση των διαγραμμάτων προκύπτει ότι η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη στο σταθμό Βασιλακίου, το οποίο είναι λογικό καθώς βρίσκεται δυτικότερα και σε μεγαλύτερο υψόμετρο από την Ανδραβίδα. Το μέγιστο μέσο μηνιαίο ύψος βροχής σημειώνεται κατά τον Δεκέμβριο, όπου στην περιοχή του Βασιλακίου είναι περίπου 235 χιλιοστά, ενώ της Ανδραβίδας 140. Παρατηρείται ότι τους θερινούς μήνες η βροχόπτωση είναι ελάχιστη έως μηδαμινή. Η μέγιστη εποχιακή διακύμανση της βροχόπτωσης παρουσιάζεται στους σταθμούς μεταξύ των μηνών Οκτωβρίου και Φεβρουαρίου.



Διάγραμμα 4.2: Μέγιστη ετήσια βροχόπτωση περιόδου 1977 – 2010.



Διάγραμμα 4.3: Αθροιστική ετήσια βροχόπτωση περιόδου 1977 - 2010

Όσον αφορά την χρονοσειρά των βροχοπτώσεων, οι μέγιστες τιμές παρουσιάζουν μια περιοδικότητα. Στο χρονικό διάστημα από 1977 έως το 2010 καταγράφονται τρεις ακραίες τιμές βροχόπτωσης και στους δύο σταθμούς, τα έτη 1980, 1990 και 2002. Αυτό σημαίνει ότι κάθε δέκα χρόνια εκδηλώνεται μια ακραία βροχόπτωση. Οπότε συμπεραίνεται ότι η συχνότητα καταγραφής βροχόπτωσης 500 χιλιοστών είναι 10 έτη. Όπως και προηγουμένως είναι η διακριτή η διαφορά στο ποσό των βροχοπτώσεων μεταξύ των δύο σταθμών, όπου στο σταθμό της Ανδραβίδας καταγράφονται λιγότερα χιλιοστά.

Ομοίως και στην περίπτωση της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης, η περιοχή στο Βασιλάκι δέχεται περισσότερα χιλιοστά βροχής, συγκριτικά με την περιοχή της Ανδραβίδας. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές αθροιστικής βροχόπτωσης δεν σημειώνονται τα ίδια έτη με την μέγιστη βροχόπτωση. Αυτό σημαίνει ότι στα έτη που σημειώθηκαν οι ακραίες μέγιστες τιμές, οι υπόλοιπες βροχοπτώσεις ήταν μικρότερες. Οπότε, αναμένεται ο κορεσμός των εδαφών σε περιεχόμενο νερό να είναι μεγαλύτερος στα έτη με μεγάλη ετήσια βροχόπτωση.

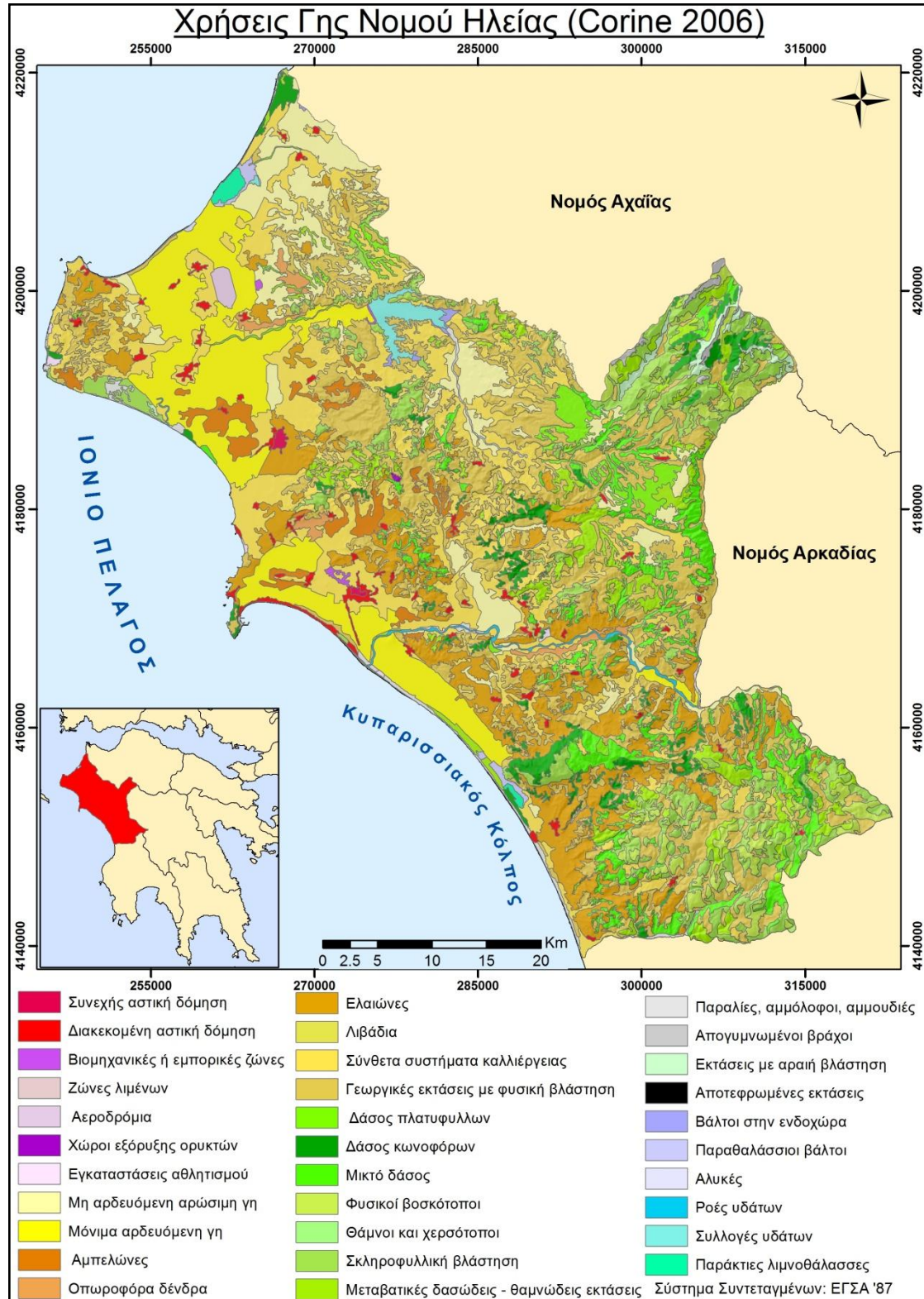
4.3 Χρήσεις Γης

Για την μελέτη των χρήσεων γης του Νομού Ηλείας αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα του προγράμματος CORINE 2006. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν την επικαιροποιημένη έκδοση των δεδομένων του CORINE 2000. Υπήρχε η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και τα δεδομένα του 2012, αλλά το χρονικό διάστημα μελέτης είναι από το 2002 έως το 2010, με αποτέλεσμα τα δεδομένα να θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικά της περιοχής μελέτης.

Σύμφωνα με το χάρτη, οι γεωργικές καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση του νομού. Οι κατηγορίες που κυριαρχούν είναι τα σύνθετα συστήματα καλλιέργειας και οι γεωργικές εκτάσεις με σημαντικό ποσοστό φυσικής βλάστησης. Παρατηρείται ότι το βόρειο τμήμα του νομού καλύπτεται αποκλειστικά από γεωργικές καλλιέργειες και από αστικές περιοχές. Αυτή η περιοχή αντιστοιχεί στην λεκάνη της Αμαλιάδας και εξαιτίας των γόνιμων εδαφών έχει ενταθεί η συστηματική καλλιέργεια. Επίσης, γεωργικές εκτάσεις εντοπίζονται και στο πεδινό τμήμα του κεντρικού τμήματος του νομού στην περιοχή του Πύργου. Γενικά παρατηρείται ότι οι επίπεδες εκτάσεις σε μικρό υψόμετρο ευνοούν την ανάπτυξη καλλιεργειών.

Αντίθετα, σε μεγαλύτερα υψόμετρα κυριαρχούν οι εκτάσεις με φυσική βλάστηση, είτε δασικές εκτάσεις, είτε θαμνότοποι. Κυρίως οι περιοχές αυτές εντοπίζονται στο νότιο τμήμα του νομού, καθώς και στο ανατολικό. Στις περιοχές αυτές εντοπίζονται και ελάχιστες αστικές περιοχές, γεγονός που οφείλεται στο έντονο ανάγλυφο της περιοχής.

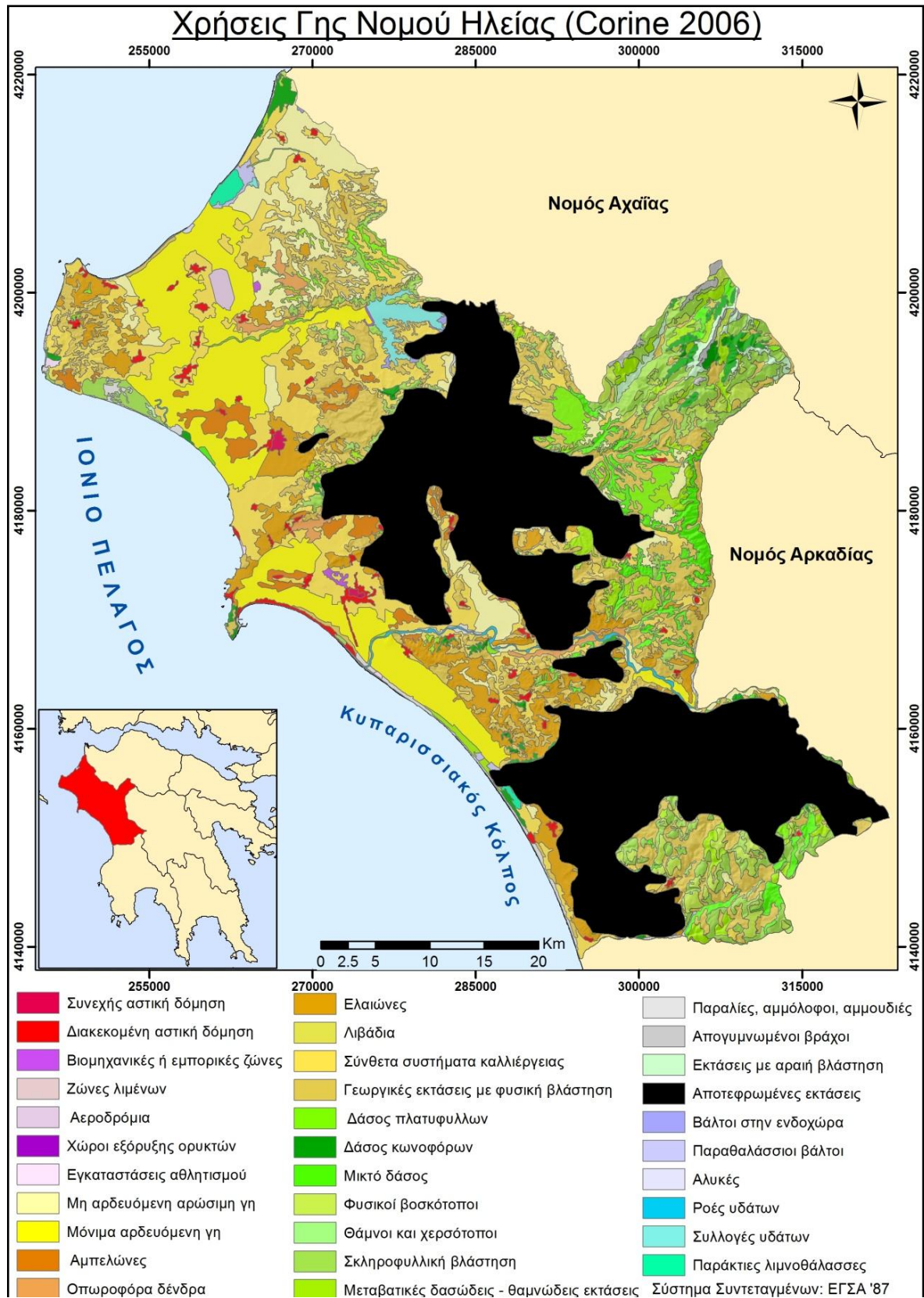
Ακόμα, αξίζουν να αναφερθούν οι υδάτινες επιφάνειες που εντοπίζονται στον Νομό Ηλείας. Αυτές αντιστοιχούν στην τεχνητή λίμνη του Πηγειού, καθώς και στην λιμνοθάλασσα Κοτυχιού. Επίσης, καταγράφεται και ο Αλφειός, καθώς έχει συνεχή ροή όλο το έτος. Δευτερεύουσες υδάτινες επιφάνειες στον νομό είναι η λίμνη του Καϊάφα και η λίμνη της Αγουλινίτσας στα νότιο τμήμα.



Χάρτης 4.4: Χρήσεις γης του Νομού Ηλείας, σύμφωνα με το πρόγραμμα Corine 2006

Πίνακας 4.1: Ποσοστά χρήσεων γης Νομού Ηλείας.

Χρήσεις Γης			Ποσοστό (%)
Τεχνητές Επιφάνειες (1.79 %)	<i>Αστικός ιστός (1.35 %)</i>	Συνεχής αστική δόμηση	0.10
		Διακεκομμένη αστική δόμηση	1.25
	<i>Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες & δίκτυα επικοινωνίας (0.33%)</i>	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.10
		Ζώνες λιμένων	0.01
		Αεροδρόμια	0.22
	<i>Ορυχεία (0.02 %)</i>	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	0.02
<i>Τεχνητές ζώνες πράσινου (0.09 %)</i>	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.09	
Γεωργικές Εκτάσεις (69.72 %)	<i>Αρόσιμη γη (17.1 %)</i>	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	7.06
		Μόνιμα αρδευόμενη γη	10.04
	<i>Μόνιμες καλλιέργειες (14.8 %)</i>	Αμπελώνες	2.03
		Οπωροφόρα δέντρα	0.66
		Ελαιώνες	12.12
	<i>Λιβάδια (0.10 %)</i>	Λιβάδια	0.10
	<i>Ετερογενείς γεωργικές εκτάσεις (37.72 %)</i>	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	16.67
Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία		21.06	
Δασικές & Ημιφυσικές Εκτάσεις (26.93 %)	<i>Δάση (10.58 %)</i>	Δάσος πλατυφυλλων	1.79
		Δάσος κωνοφόρων	2.99
		Μικτό δάσος	5.80
	<i>Θάμνοι & μακία βλάστηση (14.79 %)</i>	Φυσικοί βοσκότοποι	2.28
		Σκληροφυλλική βλάστηση	7.44
		Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	5.07
	<i>Χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση</i>	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.70
		Απογυμνωμένοι βράχοι	0.28
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση		0.58	
Υγρότοποι (0.38 %)	<i>Εσωτερικοί υγρότοποι (0.11 %)</i>	Βάλτοι στην ενδοχώρα	0.11
	<i>Παραθαλάσσιοι υγρότοποι (0.27 %)</i>	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	0.25
		Αλυκές	0.02
Υδάτινες Επιφάνειες (1.19 %)	<i>Χερσαία ύδατα (0.93 %)</i>	Ροές υδάτων	0.28
		Συλλογές υδάτων	0.64
	<i>Θαλάσσια ύδατα (0.26 %)</i>	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	0.26



Χάρτης 4.5: Χρήσεις γης και καμένες εκτάσεις μετά τις πυρκαγιές του 2007.

Ωστόσο, το καλοκαίρι του 2007 υπήρξε ιδιαίτερα καταστροφικό για τον Νομό Ηλείας, καθώς επλήγη από τις μέγα-πυρκαγιές του 2007. Αυτές έπληξαν κυρίως το νότιο και κεντρικό τμήμα του νομού, καταλαμβάνοντας πολύ μεγάλες εκτάσεις, όπως φαίνεται και στον χάρτη. Το συνολικό μέγεθος των καμένων εκτάσεων είναι 831 Km², ενώ η κεντρική έκταση ανέρχεται σε 431,4 Km² και η νότια 383,5 Km². Στο κεντρικό τμήμα αποτεφρώθηκαν κυρίως περιοχές με γεωργικές καλλιέργειες, ενώ στο νότιο με φυσική βλάστηση. Το κυριότερο όμως είναι ότι καταστράφηκαν οικισμοί, ενώ υπήρξαν και ανθρώπινες απώλειες.

Στο έδαφος, η απογύμνωση σε ακραίο βαθμό οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας της επιφανειακής απορροής κατά 15% περίπου και μείωση της ικανότητας κατείσδυσης, φαινόμενα που οδηγούν στην αύξηση της διαβρωτικής ικανότητας του νερού και την έντονη κατά βάθος διάβρωση. Επίσης έχουμε έντονα αποσαθρωτικά φαινόμενα από την καταστροφή των ριζικών συστημάτων των φυτών και της βλάστησης γενικότερα. Φαινόμενα που οδηγούν με την σειρά τους στην αστάθεια των εδαφικών μαζών και σε κατολισθήσεις, σε αυξημένη στερεοπαροχή σε ρέματα και ποτάμια, σε σημαντική αύξηση της επικινδυνότητας για φαινόμενα λασπορροών - πλημμυρών και σε φαινόμενα ερημοποίησης τα οποία αναμένεται να αλλάξουν συνολικά την εικόνα της περιοχής. Εκτός από αυτά όμως, έχουμε την εγκατάλειψη πολλών χρήσεων γης (γεωργία-κτηνοτροφία) και γενικότερα την υποβάθμιση των οικοτόπων.

4.4 Γεωλογία της περιοχής

Η περιοχή μελέτης καταλαμβάνει το δυτικό τμήμα της Πελοποννήσου και εντοπίζεται σε απόσταση περίπου 55 χμ από την Ελληνική ζώνη καταβύθισης μεταξύ της Αφρικανικής και της Ευρωπαϊκής πλάκας. Η γεωμετρία της βυθιζόμενης πλάκας είναι σε γενικές γραμμές ομαλή στην περιοχή αυτή.

Γενικά η δυτική Πελοπόννησος χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεγάλων νεοτεκτονικών δομών που αντιστοιχούν είτε σε τεκτονικά βυθίσματα (graben) είτε σε τεκτονικά κέρατα (horsts). Αυτές οι δομές οριοθετούνται από ζώνες διάρρηξης με διεύθυνση Α-Δ και ΒΒΔ-ΝΝΑ δημιουργώντας ένα σύνθετο μωσαϊκό με ιδιαίτερα νεοτεκτονικά, δομικά και χαρακτηριστικά εξέλιξης για κάθε ένα από τα τμήματα του.

Η περιοχή της Ηλείας στην δυτική Πελοπόννησο αντιστοιχεί σ' ένα μεγάλο τεκτονικό βύθισμα πρώτου βαθμού κοντά στην ζώνη καταβύθισης. Το βύθισμα της Ηλείας οριοθετείται στα βόρεια από το τεκτονικό κέρατο του Ερύμανθου ανατολικά και νότια από τα αντίστοιχα της Τρόπεας και Λάπηθα. Το εμβαδόν του βυθίσματος της Ηλείας είναι περίπου 1.500 km² αποτελούμενο από μετα-αλπικές αποθέσεις ηλικίας Αν. Μειόκαινου-Ολόκαινου και μέγιστο πάχος περίπου 3.000 μ.

Η μελέτη του γεωλογικού υποβάθρου στηρίχθηκε στους γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. κλίμακας 1:50.000,

Όνομα φύλλου	Υπεύθυνοι χαρτογράφησης	Έτος χαρτογράφησης / Έτος έκδοσης	Τύπος χάρτη
Αμαλιάς	Δρ. Ε. Καμπέρης	1977-1979	Γεωλογικός
Βαρθολομιά	Δρ. Γ. Χριστοδούλου, L. Perry, P. G. Temple	1968 / 1969	Γεωλογικός
Γούμερο	Δρ. J. J. Fleury, Δρ. P. De Wever, Δρ. A. Izart, Καθ. J. Dercourt	1975-76 / 1981	Γεωλογικός
Κερτεζή	Δρ. F. Meilliez, Δρ. J. M. Flament, Δρ. P. De Wever, Καθ. J. Dercourt	1978	Γεωλογικός
Κυπαρισσία	Δ. Μητρόπουλος, Δρ. Κ.Περισοράτης, Δρ. Ι. Αγγελόπουλος	1977-1979	Γεωλογικός
Νέα Μανωλάς	Δρ. Τσόφλιας	1972-1973	Γεωλογικός
Ολυμπία	Δρ. H. Streif, Δρ. Κ. Περισοράτης, Δ. Μητρόπουλος, Δρ. Ι. Μπορνόβας	1961-63, 1972, 1980 / 1982	Γεωλογικός
Πύργος	Δρ. H. Steif	1961-63/ 1972	Γεωλογικός
Τρόπαια	Δρ. Ν. Κατσαβριάς	1977-1978/Υπό έκδοση	Γεωλογικός
Κάτω Φυγαλεία	Ν. Λαλέχος	1969-1971	Γεωλογικός

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας διαχωρίζονται στο Αλπικό υπόβαθρο και τους μεταλπικούς σχηματισμούς:

A. Οι Μεταλπικοί Σχηματισμοί που κυρίως αποτελούνται από:

1. ιζηματογενείς ακολουθίες παράκτιων, αλλουβιακών (ποταμοχειμάρριων), πλευρικών κορημάτων και κολλουβιακών αποθέσεων του Τεταρτογενούς και
2. Νεογενείς λιμναίες και θαλάσσιες αποθέσεις

B. Στις ενότητες των Αλπικών Σχηματισμών που διαδοχικά και χωρικά ανήκουν στην

1. Ιόνια Ενότητα
2. Ενότητα Γαβρόβου -Τρίπολης
3. Ενότητα Ωλονού - Πίνδου

Οι αλπικοί σχηματισμοί καταλαμβάνουν το ορεινό τμήμα του νομού, ενώ τα Πλειοκαινικά και Πλειστοκαινικά ιζήματα την ημιορεινή και λοφώδη περιοχή. Οι πρόσφατες χαλαρές Ολοκαινικές αποθέσεις καλύπτουν τις πεδινές εκτάσεις των λεκανών των ποταμών και της παραλιακής ζώνης και καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση.

A. ΜΕΤΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Οι μεταλλικοί σχηματισμοί καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της Δ. Πελοποννήσου. Είναι κυρίως θαλάσσιοι σχηματισμοί Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας. Η λεκάνη των νεογενών ιζημάτων της Ηλείας είναι μία από τις πολλές που δημιουργήθηκαν στον Ελληνικό χώρο, μετά το τέλος της Αλπικής ορογένεσης. Η διαδοχή ανάπτυξης των νεογενών είναι από Ανατολή προς Δύση, σύμφωνα με την κίνηση του ορογενετικού τόξου, δηλαδή από τις αρχαιότερες προς τις νεότερες ζώνες. Το υπόβαθρο της λεκάνης είναι οι εξωτερικές ζώνες του Ελληνικού τόξου Ιόνιος, Γάβροβο – Τρίπολη, Ολωνού – Πίνδου (Λέκκας και συνεργάτες, 1992). Οι επιφανειακές εμφανίσεις συνίστανται από κλαστικά ιζήματα, άμμους, ιλυάργιλους τα οποία αποτέθηκαν σε διαφορετικά παλαιο-περιβάλλοντα όπως ποτάμια, λιμναία, λιμνοθάλασσα και ρηχής θάλασσας.

1.Ολοκαινικές αποθέσεις

Οι τεταρτογενείς σχηματισμοί διακρίνονται στις Ολοκαινικές ποτάμιες και χειμάρρειες αποθέσεις, τα χαλαρά πλευρικά κορήματα των κλιτύων, τους κώνους κορημάτων, τις αλλουβιακές αποθέσεις, καθώς επίσης και τις θαλάσσιες σύγχρονες παράκτιες αποθέσεις.

Καλύπτει τις πεδινές και παράκτιες περιοχές παρουσιάζοντας σημαντική ανάπτυξη και αποτελούνται από:

- Λιμνοθάλασσιες αποθέσεις, αποθέσεις τελμάτων (H.sl)
- Αναβαθμίδες ποταμού (H.t)
- Αμμοθίνες (dn)
- Παράκτιες αποθέσεις (cd)
- Αλλουβιακές αποθέσεις (al) Σύγχρονες αποθέσεις εσωτερικών λεκανών και παράκτιες αποθέσεις στις κοίτες και τις εκβολές των χειμάρρων. Αργιλοαμμώδη χαλαρά εν γένει υλικά αποτελούμενα από άργιλους, άμμους και κροκαλολατύπες.(al)
- Υλικά κατολισθήσεων (ls)
- Πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων. (sc-cs)
- Αποθέσεις ερυθρογής κυρίως εντός των καρστικών εγκοίλων. (tr)
- Τραβερίνης (tv)
- Πλειστόκαινο αδιαίρετο (Pt) (κροκαλολατυποπαγή, άμμοι, μάργες, ψαμμίτες, άργιλοι, βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι). Κατά θέσεις παρατηρείται επικράτηση μαργαϊκών ασβεστολίθων (k), κροκαλοπαγών (c), ψαμμιτών (s).
- Ποτάμιες αναβαθμίδες (Pt.t) Χειμαρρώδεις αποθέσεις λατυπών, κροκάλων, άμμων και αργίλων σε διάφορα υψόμετρα και διαφορετικού βαθμού διαγένεσης.
- Θαλάσσιες αναβαθμίδες (Pt.tm). Κροκαλοπαγή, ψαμμούχες μάργες, άμμοι και ψαμμιτικές ενστρώσεις σε διάφορα υψόμετρα και διαφορετικού βαθμού διαγένεσης.

2. Πλειστοκαινικές αποθέσεις

Τις Πλειστοκαινικές αποθέσεις άμμων, κροκαλοπαγών, αργίλων, θαλάσσιας φάσης. Οι ολοκαινικές και πλειστοκαινικές αποθέσεις παρουσιάζουν μεγάλη έκταση στο κάτω ρου των ποταμών Αλφειού και Πηνειού και συνίσταται κυρίως από άμμους, χαλίκια και αργίλους.

Στους γεωλογικούς χάρτες αναφέρονται οι Πλειστοκαινικές αποθέσεις (P1) αποτελούμενες από άμμους, ψαμμίτες, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστολίθους, κροκαλοπαγή. Κατά θέσεις παρατηρείται επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστολίθων (k) και των κροκαλοπαγών (c), άμμων (s).

3. Πλειοκαινικές αποθέσεις

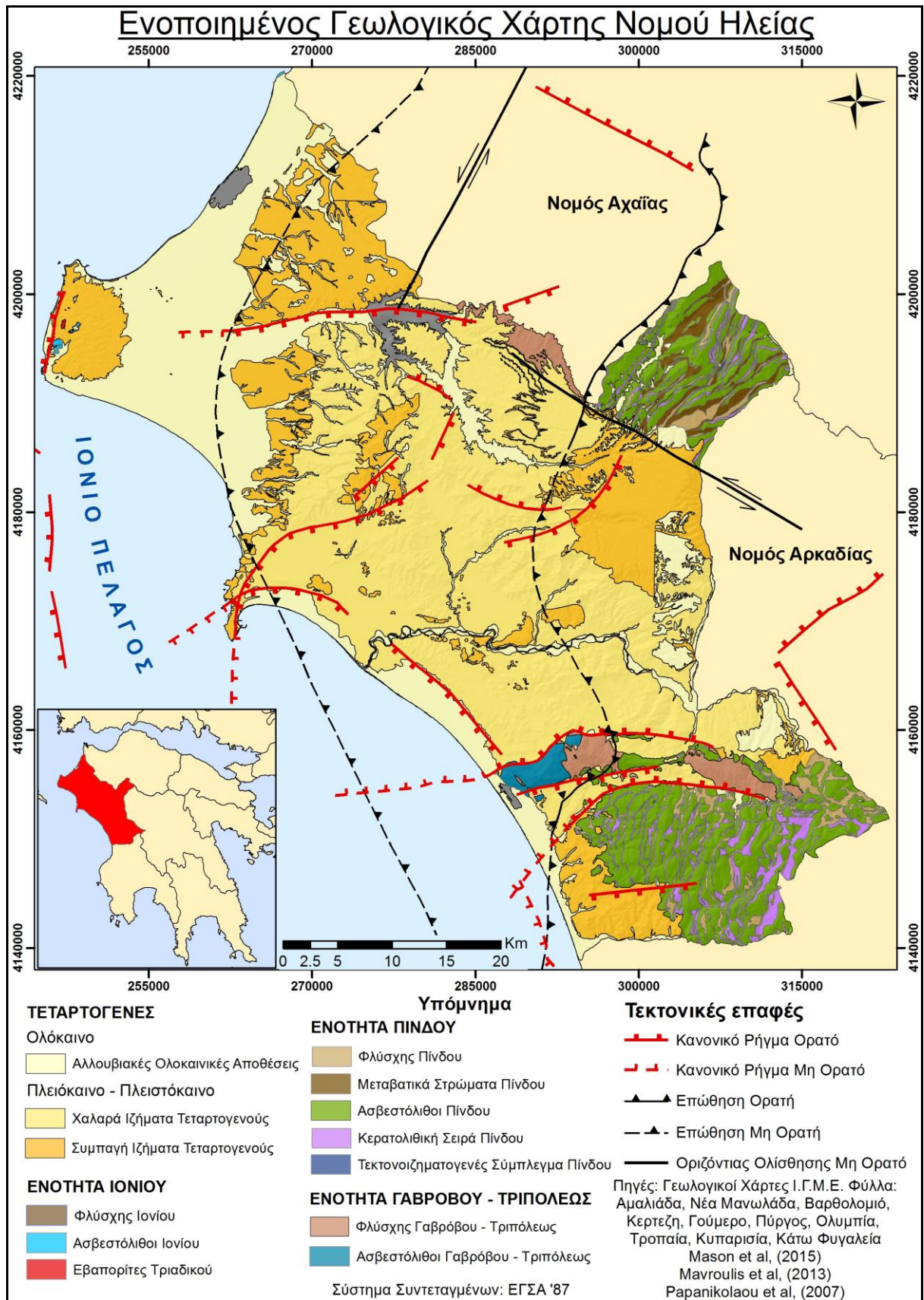
Οι Πλειοκαινικές αποθέσεις, αντιπροσωπεύουν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό λιμνοθαλάσσιες φάσεις. Αποτέθηκαν ασύμφωνα στο τέλος των αλπικών πτυχώσεων πάνω σε παλαιότερους σχηματισμούς. Η δημιουργία ρηγμάτων κατά τη διάρκεια της αλπικής ορογένεσης αποτέλεσαν αιτία δημιουργίας τεκτονικών τάφρων, μέσα στις οποίες αποτέθηκαν ιζήματα (μόλασα) που προέρχονταν από γειτονικές υψηλότερες περιοχές. Αποτέλεσμα των διάφορων κατακόρυφων κινήσεων (καταβύθιση - ανάδυση) ήταν η εναλλαγή ιζημάτων θαλάσσιας φάσης με ιζήματα λιμναίας φάσης και ορισμένες φορές χερσαίας φάσης.

Τα ιζήματα αποτελούνται από εναλλαγές στρωμάτων μαργών, αργίλων, άμμων, κροκαλοπαγών και χαλικιών. Ορισμένα από τα ιζήματα αυτά μετατράπηκαν με τη διεργασία της διαγένεσης σε ασβεστοψαμμίτες, οι οποίοι όμως έχουν μικρό πάχος και έκταση. Αναλυτικά αποτελούνται από :

- *Νεογενές αδιαίρετο* (Ng) αποτελούμενο από μάργες, ψαμμίτες και μαργαϊκούς ασβεστολίθους παχυστρωματώδεις έως άστρωτους.
- *Πλειοκαινικές αποθέσεις* (P1). Πλειοκαινικές αποθέσεις αποτελούμενες από μαργαϊκούς ψαμμίτες, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστολίθους, κροκαλοπαγή και παρεμβολές γύψων (g). Κατά θέσεις παρατηρείται επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστολίθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).
- *Μειοκαινικές αποθέσεις* (M). Μειοκαινικές αποθέσεις αποτελούμενες από μαργαϊκούς ψαμμίτες, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστολίθους, κροκαλοπαγή και παρεμβολές γύψων (g). Κατά θέσεις παρατηρείται επικράτηση των μαργών (m), των μαργαϊκών ασβεστολίθων (k) και των κροκαλοπαγών (c).

B. ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Η ευρύτερη περιοχή έρευνας δομείται από αλπικούς και μεταλπικούς σχηματισμούς. Αναφορικά με τους αλπικούς σχηματισμούς, αυτοί ανήκουν κυρίως στις γεωτεκτονικές ενότητες Πίνδου και Γαβρόβου, ενώ συμμετέχει και η Ιόνιος ζώνη με μια μικρή εμφάνιση στη περιοχή της λίμνης Καϊάφα.



Χάρτης 4.6: Ενοποιημένος γεωλογικός χάρτης Νομού Ηλείας.

Η γεωτεκτονική ενότητα της Πίνδου επικρατεί στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης. Οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στη ζώνη αυτή είναι οι τριαδικοϊουρασικοί και κρητιδικοί ασβεστόλιθοι, μέλη της σχιστοκερατολιθικής σειράς, ιζήματα μετάβασης στο φλύσχη και ο φλύσχης.

Η γεωτεκτονική ενότητα Γαβρόβου εντοπίζεται στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας, στο όρος Λάπιθας, όπου εμφανίζονται τα ανώτερα μέλη της ανθρακικής σειράς και τα ιζήματα του φλύσχης της ζώνης. Τέλος, στη γεωλογική δομή της περιοχής συμμετέχει και μια πολύ μικρή εμφάνιση ανθρακικών σχηματισμών της Ιόνιας ενότητας (Φουντούλης & Λέκκας, 1991).

Ιόνια Ενότητα

Στην Ιόνια ζώνη περιλαμβάνεται και η ημιμεταμορφωμένη σειρά των Πλακωδών Ασβεστόλιθων ή σειρά των Plattenkalk. Η Ιόνια ενότητα αποτελούσε μία υποθαλάσσια αύλακα, η οποία παρεμβλλόταν ανάμεσα στο υποθαλάσσιο ύβωμα της Απούλιας ζώνης (δυτικά) και στο ύβωμα Γαβρόβου-Τρίπολης (ανατολικά).

Στην περιοχή των Ιόνιων νησιών, η Ιόνια ενότητα είναι επωθημένη προς τα δυτικά πάνω στη ενότητα των Παξών, ενώ προς τα ανατολικά πάνω στη ενότητα αυτή βρίσκεται επωθημένη η ενότητα της Πίνδου. Αντίθετα, νοτιότερα στο χώρο της Πελοποννήσου - Κρήτης και άλλων νησιών, οι σχηματισμοί της Ιόνιας ενότητας είναι ημιμεταμορφωμένοι και συνιστούν τη σειρά των Plattenkalk.

Στη περιοχή μελέτης, η Ιόνια ενότητα καταλαμβάνει πολύ μικρή έκταση στην περιοχή του ακρωτηρίου Αράξου, όπου αναδύεται από τις σύγχρονες αποθέσεις και περιλαμβάνει μεσοστρωματώδεις ασβεστολίθους με πυριτολίθους και στρώματα του φλύσχης στην περιοχή της Λακόπετρας. Μικρή εμφάνιση ασβεστόλιθων της Ιόνιας ενότητας συναντάται επίσης στο ακρωτήρι Κουνουπελάκι. Επίσης, Γύψοι συναντώνται εντός των νεογενών αποθέσεων και στη βάση της Ιονίου ενότητα. (g)

Αναλυτικά οι σχηματισμοί που απαντώνται είναι οι εξής:

- *Φλύσχης* (fi) (Hώκαινο – Ολιγόκαινο). Αποτελούμενος από ψαμμίτες, μαρμαρυγιακούς ψαμμίτες, μάργες και ιλυώδεις αργίλους .
- *Λατυποπαγές και ασβεστόλιθος* (Ks.k) (Ανώτερο Κρητιδικό). Λεπτοστρωματώδεις σπάνια με κονδύλους πυριτολίθων.
- *Ασβεστόλιθοι Βίγλας* (Jm-Ks) (Μέσω Ιουρασικό – Ανώτερο Κρητιδικό). Πλακώδεις ασβεστόλιθοι εναλλασσόμενοι στα κατώτερα μέλη με στρώματα πυριτολίθου.

Τεκτονοιζηματογενής Σχηματισμός (cts).

Προέρχεται από τους ανώτερους ορίζοντες της ενότητας Τρίπολης καθώς και από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, και εκρηξιγενή πετρώματα (ανδесиτικούς τόφφους, βασάλτες, διορίτες κλπ).

Ενότητα Ωλονού - Πίνδου

Οι σχηματισμοί της ενότητας της Πίνδου είναι επωθημένοι στα ιζήματα του φλύσχη της ενότητας Γαβρόβου - Πύλου (περιοχές όρους Λάπιθα). Στην περιοχή έρευνας εμφανίζονται όλοι οι σχηματισμοί που συγκροτούν τη λιθοστρωματογραφική της στήλη, δηλαδή από το Μέσο Τριαδικό μέχρι και το Μέσο - Ανώτερο Ηώκαινο.

Η ενότητα Ωλονού Πίνδου αποτελείται κύρια από:

Ραδιολαρίτες, που συντίθενται από λεπτές ενστρώσεις ερυθρών και πράσινων ιασιδών, ερυθρού αργιλικού υλικού και ερυθρών λεπτοπλακωδών ασβεστολίθων πλούσιων σε πυριτικό υλικό και ακτινόζωα. Σε διάφορες θέσεις παρατηρούνται μαγγανιούχοι εμποτισμοί. Στα ενδιάμεσα και τα ανώτερα μέλη των ραδιολαριτών υπάρχουν πάγκοι μικρολατυποπαγών ασβεστολίθων.

Λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους, που είναι έντονα πτυχωμένοι σε στρώσεις πάχους μέχρι 10 cm, που εναλλάσσονται με ασβεστολιθικούς πάγκους πάχους μέχρι 50 cm. Οι πάγκοι περιέχουν κονδύλους πυριτολίθων. Στη βάση του, ο ορίζοντας αυτός, είναι πλούσιος σε πυριτικό υλικό που ελαττώνεται προοδευτικά στα ανώτερα μέλη του. Το πάχος του υπολογίζεται στα 400 m.

Φλύσχη, που αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτικών πάγκων, αργίλων, μαργών. Τα στρώματα μετάβασης στο φλύσχη, συνολικού πάχους 50 m αποτελούνται από λεπτές ασβεστολιθικές στρώσεις πάχους 2-10 cm, που εναλλάσσονται με ψαμμιτικές, αργλικές και μαργαϊκές στρώσεις πάχους 1-3 cm. Το συνολικό πάχος του φλύσχη φτάνει τα 400 m.

Αναλυτικότερα οι σχηματισμοί αυτοί από τους παλαιότερους στους νεότερους έχει ως εξής:

- *Τυπικός Φλύσξης (fo) (Ηώκαινο)*. Τα ανώτερα μέλη αποτελούνται από ρυθμικές και τοπικά άρρυθμες εναλλαγές τεφρών, κιτρινοπών, καστανόχρωμων ψαμμιτών με λεπτά στρώματα βαθύχρωμων «σχιστοποιημένων» λεπτόκοκκων έως μεσόκοκκων πηλιτών, ιλυούχων και αργιλικών μαργών και ψαμμούχων ασβεστόλιθων κύρια στα κατώτερα μέλη.
- *Στρώματα μετάβασης προς το φλύσχη (K.Pc,k) (Παλαιόκαινο)*. Πρόκειται για εναλλαγές πελαγικών ασβεστόλιθων που περιέχουν στρώματα πυριτολίθων, ερυθρών μαργών και μαργαϊκών ασβεστολίθων.
- *Ανθρακικά (Ks.k) (Ανώτερο Κρητιδικό)*. Πρόκειται για πολύχρωμους λεπτομέσο- τοπικά παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους στους οποίους παρεμβάλλονται ερυθρές ή κίτρινες μάργες
- *Κλαστικός σχηματισμός (fo.1k) (Κάτω – Μέσο Κρητιδικό)*. Περιλαμβάνει δύο σχηματισμούς: τον Κλαστικό σχηματισμό ηλικίας Μέσο Κρητιδικό, δηλαδή τον "Πρώτο Φλύσχη" και τους Αργιλίτες - Ασβεστόλιθους με Calpionellidae.

- *Σχιστοκερατολιθική σειρά (J-K,sch)* (Ανώτερο Ιουρασικό). Περιλαμβάνονται ραδιολαρίτες, κερατόλιθοι και σπανιότερα ερυθροί πηλίτες και ψαμμίτες καθώς επίσης και λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι.
- *Ασβεστόλιθοι (J.sk)* (Ιουρασικό). Υπόλευκοι, πρασινωποί, ερυθρόχρωμοι, λεπτόκοκκοι, μεσόκοκκοι έως αδρόκοκκοι κατά θέσεις λατυποπαγείς, λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους με ενστρώσεις φακούς και κονδύλους πολύχρωμων κερατολίθων και με ενδιαστρώσεις πολύχρωμων αργιλικών σχιστολίθων, πηλιτών και ιάσπιδων.
- *Κλασική Τριαδική σειρά (Ts-k)* (Μέσο – Ανώτερο Τριαδικό). Στην περιοχή έρευνας, η τυπική φάση των ασβεστόλιθων, έχει αντικατασταθεί από ψαμμιτομαργαϊκά στρώματα στα οποία παρεμβάλλονται ασβεστόλιθοι.

Ενότητα Γαβρόβου - Τριπόλεως

Ο χώρος στον οποίο αποτέθηκαν τα ιζήματα της ενότητας Γαβρόβου-Τρίπολης, αποτελούσε ένα τεράστιο υποθαλάσσιο ύβωμα που χώριζε την Ιόνια από την Πινδική αύλακα. Στο χώρο αυτόν, από το Μέσο-Ανώτερο Τριαδικό μέχρι και το Ηώκαινο, λάμβανε χώρα νηριτική και υφαλογόνα ιζηματογένεση με ασβεστόλιθους και δολομίτες, με τοπικές ανωμαλίες. Οι ασβεστόλιθοι που αποτέθηκαν είναι σκοτεινοί-τεφροί έως μαύροι, κατά τόπους λατυποπαγείς και πλούσιοι σε απολιθώματα.

Η ενότητα Γαβρόβου-Τρίπολης τόσο στη Δυτική Ηπειρωτική Ελλάδα, όσο και στην εξωτερική (δυτική) παρυφή της στην Πελοπόννησο, αναπτύσσεται στο μέτωπο του τεκτονικού καλύμματος της ζώνης Πίνδου. Αντίθετα, στην υπόλοιπη Πελοπόννησο και σε άλλες περιοχές, οι σχηματισμοί της ενότητας αυτής βρίσκονται τεκτονικά κάτω από το κάλυμμα της Πίνδου.

Ο ορογενετικός τεκτονισμός της ενότητας Γαβρόβου-Τρίπολης, έλαβε χώρα κατά το Τριτογενές. Κατά το διάστημα αυτό επωθήθηκε το πινδικό τεκτονικό κάλυμμα πάνω στο ανατολικό τμήμα της ενότητας Γαβρόβου-Τρίπολης. Από το Ανώτερο Ηώκαινο έως το Κατώτερο Μειόκαινο, στην περιοχή λάμβανε χώρα έντονη καταβύθιση οπότε και αποτέθηκε ο φλύσχος (πάχος 2000 μ). Είναι μαργαϊκός και περιέχει μεγάλες κροκάλες κερατολίθων, οι οποίες προέρχονται από τη ενότητα Πίνδου.

Η νεοτεκτονική δομή του Κυπαρισσιακού κόλπου περιλαμβάνει διαδοχικά τεκτονικά κέρατα και βυθίσματα και η δομή αυτή εκτείνεται από το όρος Κυπαρισσία μέχρι και τη χερσόνησο του Κατάκολου και της τεκτονικής ζώνης του Βουνάργου. Ξεκινώντας από νότια το όρος της Κυπαρισσίας (1.225 m.) αντιπροσωπεύει ένα νεοτεκτονικό κέρας ανυψωμένο και αποτελείται από τους αλπικούς σχηματισμούς της ζώνης της Πίνδου.

Η ενότητα Γαβρόβου –Τριπόλεως αποτελείται κύρια από δολομίτες, που μεταπίπτουν σε δολομίτες υφαλώδους τύπου με φύκι και στη συνέχεια σε εναλλαγές λευκών και μαύρων δολομιτών και νηριτικών ασβεστολίθων, με πάχος πολλές εκατοντάδες μέτρα. Ασβεστόλιθους παχυστρωματώδεις και δολομίτες λεπτοστρωματώδεις με πάχος σχηματισμού πολλές εκατοντάδες μέτρα. Ασβεστόλιθους νηριτικούς, που συχνά είναι ωολιθικοί, με ορίζοντες δολομιτών, οι οποίοι προς τα πάνω μεταπίπτουν σε ασβεστόλιθους με κροκαλοπαγή και ασβεστομαργαϊκά υλικά, που αποτελούν τη ζώνη μετάβασης στο φλύσχη.

Φλύσχης με ασβεστόλιθους βιοκλαστικούς και κροκαλοπαγή στη βάση τους, ενώ η κύρια ιζηματογενής ακολουθία πάχους μέχρι και 4500 μέτρα, αποτελείται από ιλυούχους ψαμμίτες έως ψαμμίτες με ενστρώσεις ή φακούς κροκαλοπαγών, μικρολατυποπαγών και ιλυολίθων, Κροκαλοπαγή, με κροκάλες από όλους τους στρωματογραφικούς ορίζοντες της ενότητας Ωλονού-Πίνδου, που εντοπίζονται κυρίως στους ανώτερους ορίζοντες.

Στην περιοχή μελέτης απαντώνται οι ακόλουθοι σχηματισμοί:

- *Ιζήματα του Φλύσχη* (ft, ft1.slt, ft2.c ft2.st, ft3.slt) (Κατώτερο Ηώκαινο - Ολιγόκαινο). Αποτελούνται από εναλλαγές πηλιτών, ιλυολίθων και λεπτόκοκκων ψαμμιτών, με σπάνιες κροκαλοπαγείς ενστρώσεις, οι κροκάλες των οποίων προέρχονται από τους σχηματισμούς της Πίνδου.
- *Στρώματα μετάβασης προς το φλύσχη* (E.k) (Παλαιόκαινο – Κατώτερο Ολιγόκαινο). Ασβεστόλιθοι βιοκλαστικοί και μονόμεικτα κροκαλοπαγή, εναλλασσόμενοι με ασβεστομαργαϊκούς ορίζοντες.
- *Ανθρακικά πετρώματα* (K.k) (Ανω Κρητιδικό – Ηώκαινο): Αποτελούνται από λευκούς έως τεφρούς ανωκρητι-δικούς-ηώκαινικούς ασβεστόλιθους.
- *Ασβεστόλιθοι* (K₈₋₉.k) (Κρητιδικό). μεσοπαχυστρωματώδεις έως άστρωτοι, κατά θέσεις λατυποπαγείς, έντονα τεκτονισμένοι, που συχνά μεταπίπτουν σε δολομίτες (d).

Τεκτονική – νεοτεκτονική δομή της περιοχής έρευνας

Κατά την αλπική φάση επικρατούσε ο εφαιπτομενικός τεκτονισμός, και δημιουργήθηκαν οι πτυχές, οι επιπεύσεις, τα καλύμματα με γενική διεύθυνση αξόνων και λεπών Β-Ν έως ΒΒΔ – ΝΝΑ, καθώς επίσης και ορισμένα ρήγματα. Τα ρήγματα αυτά παρατηρούνται κυρίως μέσα στις αλπικές γεωτεκτονικές ενότητες της Τρίπολης και της Πίνδου και δεν κόβουν μεταλλικές αποθέσεις. Η παραμόρφωση αυτή έλαβε χώρα κύρια κατά την περίοδο Ηώκαινο - Κατώτερο Μειόκαινο (Φουντούλης, 2000).

Η νεοτεκτονική περίοδος, κινηματικά χαρακτηρίζεται από κατακόρυφες κινήσεις, είναι δε η περίοδος κατά την οποία δημιουργούνται τα τεκτονικά κέρατα και βυθίσματα τα οποία συνήθως οριοθετούνται μεταξύ τους με ρηξιγενείς ζώνες. Επίσης δημιουργούνται καινούργια ρήγματα τόσο μέσα στους μεταλπικούς σχηματισμούς, οπότε είναι εύκολο να διακριθούν από τα παλαιά, όσο και μέσα στους αλπικούς σχηματισμούς, οπότε και είναι πολύ δύσκολο να διακριθούν από τα παλαιότερα, ή επαναδραστηριοποιούνται ρήγματα που είχαν δημιουργηθεί κατά την αλπική τεκτονική φάση. Οι Μαριολάκος & Παπανικολάου (1987), θεωρούν ότι η νεοτεκτονική εξέλιξη της Πελοποννήσου, από γεωδυναμική άποψη, δεν χαρακτηρίζεται από απλό αξονικό εφελκυσμό, αλλά από ένα σύνθετο σύστημα συζυγών ρηγμάτων τα οποία έχουν δραστηριοποιηθεί από ένα γενικότερο εντατικό πεδίο διατμητικού και περιστροφικού χαρακτήρα.

Η νεοτεκτονική δομή της Δυτικής Πελοποννήσου χαρακτηρίζεται από την παρουσία μεγάλων τεκτονικών κεράτων και βυθισμάτων (νεοτεκτονικές μακροδομές 1^{ης} τάξης) με διευθύνσεις Α – Δ και ΒΒΔ – ΝΝΑ, η οριοθέτηση των οποίων γίνεται από μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες αντίστοιχων διευθύνσεων (Μαριολάκος & Φουντούλης, 1991). Αυτές οι δύο κύριες διευθύνσεις των ρηξιγενών ζωνών τέμνονται κατά μήκος μιας νοητής γραμμής με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, η οποία χωρίζει την Πελοπόννησο, από το νοτιοδυτικό της άκρο στη Πύλο έως το βορειοανατολικό της άκρο στον Ισθμό της Κορίνθου, σε δύο τμήματα, το βορειοδυτικό και το νοτιοανατολικό.

Χαρακτηριστικές μακροδομές 1^{ης} τάξης στη δυτική Πελοπόννησο είναι:

Το τεκτονικό κέρασ του Λάπιθα. Το κέρασ του Λάπιθα αποτελείται από δύο ρήγματα, το βόρειο και το νότιο. Η νότια ρηξιγενής ζώνη του Λάπιθα οριοθετεί το τεκτονικό κέρασ από το τεκτονικό βύθισμα της Ζαχάρως, έχει μέχρι το "ύψος" της Πλατιάνας μέση διεύθυνση Α - Δ, ενώ μετά αλλάζει σε ΒΔ – ΝΑ. Αποτελείται από ρήγματα ΑΒΑ – ΔΝΔ και ΒΔ – ΝΑ διευθύνσεων, σε en echelon διάταξη. Από αυτά, μερικά είναι παλαιά, αφού φέρνουν σε επαφή το φλύσχη με τα ανθρακικά της ενότητας Γαβρόβου – Τρίπολης (Φουντούλης, Ι., 2000). Οι Mason et al (2015) εκτιμούν ότι το μήκος του είναι 5 Km, όπου βάσει εμπειρικών εξισώσεων το αναμενόμενο μέγιστο μέγεθος σεισμού είναι ίσο με Mw=5.8 περίπου.

Το βόρειο ρήγμα που οριοθετεί το τεκτονικό κέρασ του Λάπιθα με την λεκάνη της Ολυμπίας θεωρείται πολύ πιο επικίνδυνο, καθώς οι Papanikolaou et al (2007) υπολόγισαν μέσο ρυθμό άλματος 1.0 mm/ έτος. Οι ανωτέρω συγγραφείς αναφέρουν ότι το ρήγμα συνεχίζει υποθαλάσσια, με συνολικό μήκος 25 Km. Οι Mason et al (2015) αναφέρουν ότι το βόρειο ρήγμα αποτελείται από δύο τμήματα, ένα στην ξηρά και ένα υποθαλάσσιο που επεκτείνεται δυτικά, στον Κυπαρισσιακό κόλπο. Το μήκος του πρώτου εκτιμάται περίπου 18 km, ενώ του δεύτερου 15. Το μέγιστο αναμενόμενο σεισμικό μέγεθος (Mw) είναι 6.5 και 6.4, αντίστοιχα.

Το σύνθετο τεκτονικό βύθισμα Μεγαλόπολης – Λύκαιου – Μίνθης – Τετράζιου που έχει μέση διεύθυνση Α - Δ. Οριοθετείται ανατολικά από τη ρηξιγενή ζώνη της Μεγαλόπολης, διεύθυνσης ΒΒΔ – ΝΝΑ, βόρεια από τη ρηξιγενή ζώνη του Λάπιθα, διεύθυνσης Α - Δ και νότια από τη ρηξιγενή Κυπαρισσίας - Αετού - Λεονταρίου μέσης διεύθυνσης Α - Δ. Η περιοχή αυτή μορφολογικά αν και δίδει περισσότερο την εντύπωση τεκτονικού κέρατος παρά τεκτονικού βυθίσματος, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ούτε σαν τυπικό τεκτονικό βύθισμα, ούτε σαν τυπικό σύγκλινο, αφού συνυπάρχουν χαρακτηριστικά και των δύο δομών. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι η εν λόγω δομή υπήρξε το πρώιμο στάδιο της δημιουργίας του Κυπαρισσιακού κόλπου, του ο-ποίου αποτελεί την προς τα ανατολικά προέκταση (Φουντούλης, Ι., 2000).

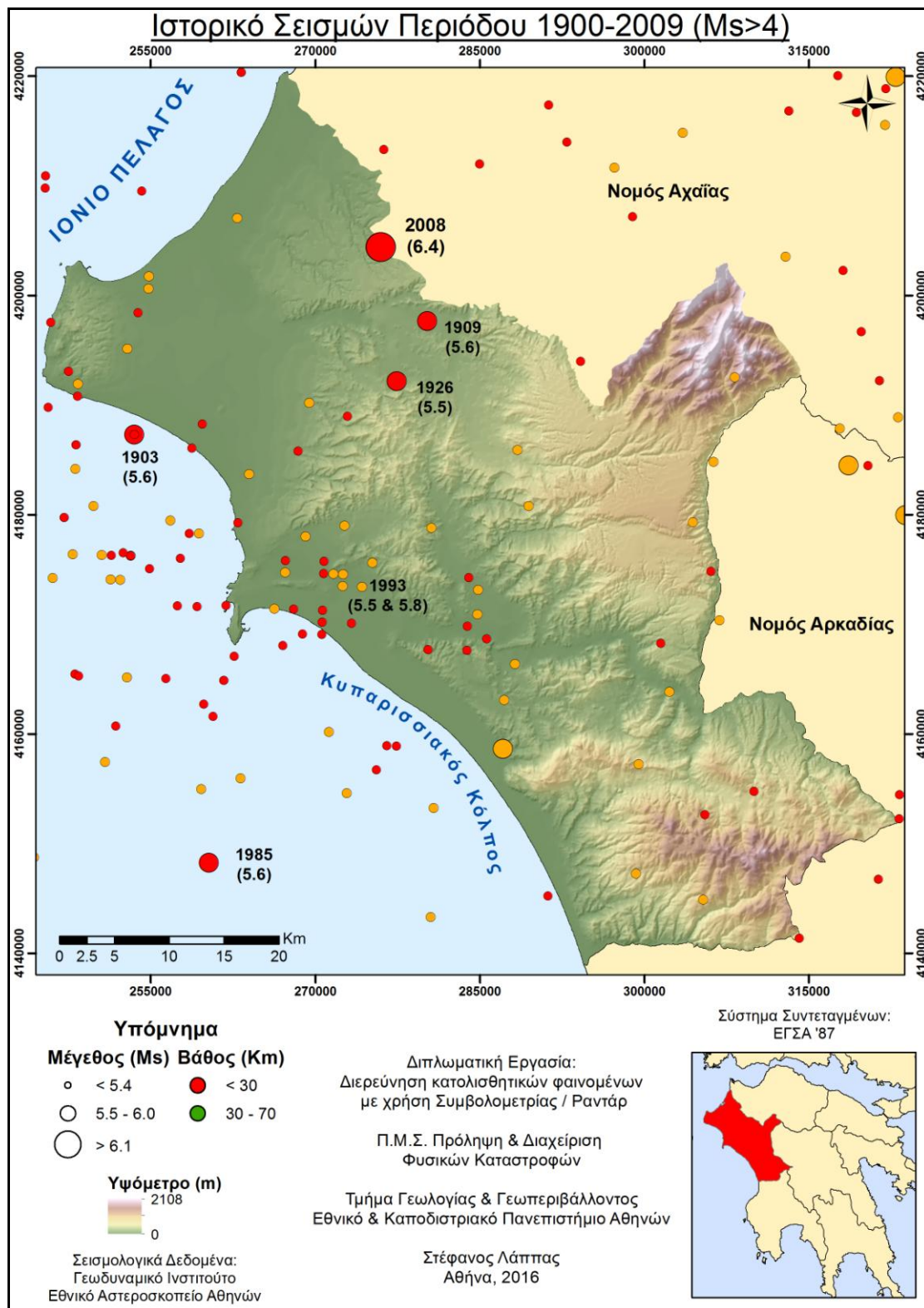
Τα ρήγματα των ρηξιγενών ζωνών δεν είναι συνεχή, αλλά διακόπτονται από άλλα ρήγματα που, αν και ανήκουν στην ίδια ρηξιγενή ζώνη, έχουν άλλη διεύθυνση. Πρόκειται στη ουσία για συζυγή συστήματα ρηγμάτων. Η "κλιμακωτή" (en echelon) διάταξη των περιθωριακών ρηγμάτων, επιτρέπει να λεχθεί ότι δεν πρόκειται για απλά κανονικά ρήγματα αλλά για πλάγιο-κανονικά (oblique slip normal), οπότε από άποψη δυναμικής, η παραμόρφωση δεν συνδέεται με εντατικό πεδίο αξονικού εφελκυσμού αλλά με ζεύγος αντίρροπων δυνάμεων και επομένως τα φαινόμενα στρέψης είναι παρόντα σε όλες τις κλίμακες (Μαριολάκος & Παπανικολάου, 1987, Μαριολάκος & Φουντούλης, 1991).

Μέσα σε αυτή τη σύνθετη νεοτεκτονική μακροδομή 1^{ης} τάξης υπάρχουν άλλες νεοτεκτονικές μακροδομές μικρότερων τάξεων (2ης, 3ης), δηλαδή μικρότερα τεκτονικά κέρατα και βυθίσματα, τα οποία αναπτύσσονται είτε στο εσωτερικό είτε στα περιθώριά του, τα οποία είναι: i) το Τεκτονικό βύθισμα Ζαχάρως, ii) το Τεκτονικό κέρασ Μίνθης και iii) το Τεκτονικό βύθισμα Νέδα

Σεισμικότητα – εδαφική σεισμική επικινδυνότητα

Η περιοχή της Δυτικής Πελοποννήσου παρουσιάζει έντονη σεισμική δραστηριότητα από αρχαιότατων χρόνων καθώς ανήκει σε ζώνη που γενικά επηρεάζεται από κέντρα αυξημένης σεισμικότητας (π.χ. ζώνη καταβύθισης Αφρικανικής πλάκας, Κορινθιακός), τα οποία έχουν πληγεί στο παρελθόν από σχετικά μεγάλους σεισμούς, με αρκετές καταστροφές στις κατασκευές. Ειδικότερα η γεωγραφική θέση της περιοχής έρευνας προδικάζει την άμεση εκδήλωση σχετικά αυξημένης σεισμικότητας, καθώς βρίσκεται όπως και όλη η περιοχή των δυτικών ακτών της Πελοποννήσου πολύ κοντά στη ζώνη καταβύθισης της αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική.

Για την καλύτερη κατανόηση της δυναμικής φόρτισης των σχηματισμών που γεωλογικά δομούν την ευρύτερη περιοχή έρευνας, κρίθηκε σκόπιμο να συγκεντρωθούν τα αναγκαία στοιχεία των ενόργανων καταγραφών για τη σεισμική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή του χώρου έρευνας.



Χάρτης 4.7: Ιστορικά σεισμικά γεγονότα περιόδου 1900 – 2009.

Ως γνωστό, η Δυτική Πελοπόννησος, από την Καλαμάτα μέχρι την Πάτρα, έχει πληγεί τα τελευταία 22 χρόνια από επτά σειμούς οι οποίοι προκάλεσαν ανθρώπινα θύματα και υλικές ζημιές.

- Καλαμάτα, 1986, Mw=6.0
- Κυλλήνη, 1988, Mw=6.0
- Πύργος, 1993, Mw=5.4
- Πάτρα, 1993, Mw=5.4
- Βαρθολομιό, 2002, Mw=5.6
- Κορώνη, 2008, Mw=6.7
- Αχαΐας – Ηλείας, 2008, Mw=6.5

Στον χάρτη ιστορικής σεισμικότητας απεικονίζονται τα γεγονότα με μέγεθος χάρτης επικέντρων για σεισμούς με μέγεθος $M_s \geq 4$ στην περιοχή της Ηλείας. Η εικόνα της σεισμικότητας στον χάρτη αυτό δεν διαφέρει πολύ με την εικόνα που θα προέκυπτε αν παρουσιάζονταν οι ιστορικοί σεισμοί. Επίσης, σε σχετικά μικρές επικεντρικές αποστάσεις έχουν γίνει μεγάλοι σεισμοί ($>6.5M_s$) ενώ σε λίγο μεγαλύτερες αποστάσεις τα μεγέθη είναι αρκετά μεγάλα (7.0 M_s).

Συνολικά, στην περιοχή που αναφέρθηκε, σημειώθηκαν κατά την περίοδο 1901-2009, 170 σεισμικές δονήσεις. Αναλυτικότερα, το πλήθος των σεισμικών συμβάντων είναι μεγαλύτερο για μεγέθη 4.0 - 5.0 (147), ενώ ο αριθμός μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος. Υπάρχουν 16 σεισμικά συμβάντα για σεισμούς μεγέθους 5.1 έως 5.5, 6 σεισμικά συμβάντα για σεισμούς μεγέθους 5.6 έως 6.0 και 1 συμβάντα για σεισμούς μεγέθους 6.1 έως 7.0.

Σεισμός του Πύργου το 1993

Στις 26 Μαρτίου 1993 σημειώθηκαν συνολικά 6 σεισμοί μέτριου μεγέθους στη πόλη του Πύργου, ενώ ο μεγαλύτερος είχε τοπικό μέγεθος $M=5,5$ και είχε βάθος 10χλμ. Ο σεισμός προκλήθηκε από πλαγιοκανονικό ρήγμα ΝΔ της πόλης και προκάλεσε σημαντικές ζημιές στη περιοχή. Πολλά στοιχεία στην επίκεντρο περιοχή δείχνουν ότι τα ρήγματα βρίσκονταν μέσα σε 2 τεκτονικές τάφρους στη λεκάνη του Πύργου, και τη λεκάνη Αλφειού, όπου ενεργοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του σεισμού και των μετασεισμών. Από μορφοτεκτονικά δεδομένα αποδεικνύεται ότι η πιο ενεργός δομή μέσα στη λεκάνη, είναι αυτή του Αλφειού. Έχει βάθος 25km και διασχίζει τη λεκάνη του Πύργου.

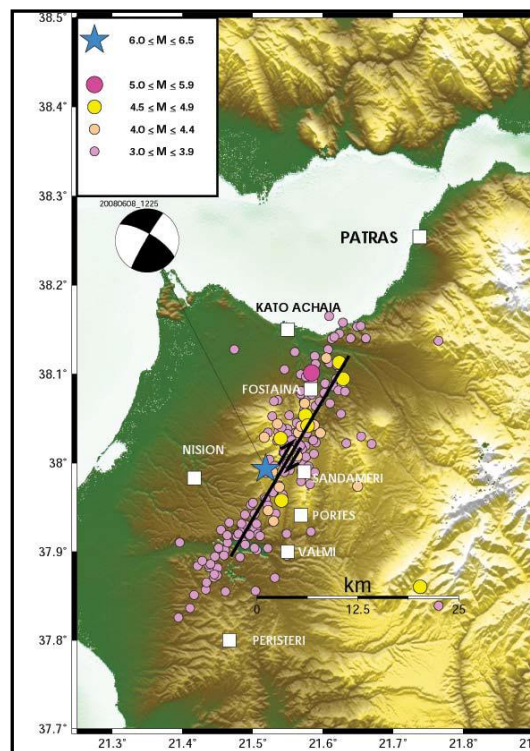
Το 1993 ο σεισμός προκάλεσε πληθώρα κατολισθήσεων και φαινόμενα υγροποίησης μέσα σε μια περιοχή 145km^2 , (Koukouvelas et al., 1996) η οποία καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα της λεκάνης του Πύργου.

Σεισμός της Ανδραβίδας το 2008

Ο σεισμός μεγέθους 6.4 ρίχτερ και βάθους 3 km που έλαβε χώρα στις 8 Ιουνίου 2008 στο Μόβρι έπληξε τη ΝΔ Πελοπόννησο, προκάλεσε εκτενής ζημιές σε κτήρια, και ευρείες εδαφικές καταστροφές. Επίσης, ο σεισμός προκάλεσε βλάβες σε οικισμούς της Αχαΐας και Ηλείας και έγινε αισθητός σε μεγάλο μέρος του Ελληνικού χώρου, την Κρήτη καθώς επίσης στην Νότια Ιταλία και την Αλβανία.

Ο χάρτης της Εικόνα 4.1 δίνει τη γεωγραφική κατανομή των σεισμών στην ιστοσελίδα της Αμερικάνικης Γεωλογικής Υπηρεσίας (USGS). Το άστρο παριστάνει τη θέση του επικέντρου. Επίσης φαίνεται η κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών με μεγέθη $3.0 < M < 5.0$ με βάση τον κατάλογο των σεισμών του Σεισμολογικού Σταθμού του ΑΠΘ μέχρι την 20 Ιουνίου 2008. Στο ίδιο σχήμα δίνεται και ο μηχανισμός γένεσης του σεισμού, ο οποίος προήλθε από ένα δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης.

Η κατανομή των επικέντρων δείχνει να κατανέμεται σε μία ζώνη με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ η οποία είναι σε καλή συμφωνία με τον μηχανισμό γένεσης. Το μπλε άστρο δείχνει την θέση του επικέντρου, ενώ τα άσπρα τετράγωνα τις θέσεις των οικισμών στους οποίους παρατηρήθηκαν βλάβες. Η μαύρη γραμμή παριστάνει το ρήγμα του σεισμού όπως προκύπτει από τη κατανομή των επικέντρων. Αν λάβουμε υπόψη ότι το μέσο μέγεθος του σεισμού ήταν 6.4 τότε με βάση τη σχέση την οποία πρότεινε ο Παπαζάχος (1989) προκύπτει μήκος ρήγματος 26 km γεγονός το οποίο είναι σε καλή συμφωνία με την κατανομή των επικέντρων.



Εικόνα 4.1: Επικέντρο και μηχανισμός γένεσης του σεισμού της Ανδραβίδας το 2008 (USGS).

4.5 Ιστορικό Κατολισθήσεων στον Νομό Ηλείας

Η περιοχή του Νομού Ηλείας και κατά κύριο λόγο οι ορεινές και ημιορεινές περιοχές, παρουσιάζει μεγάλη συχνότητα και πυκνότητα κατολισθήσεων. Αρκετές δεκάδες εκθέσεων έχουν συνταχθεί από δημόσιους κυρίως φορείς για την αντιμετώπιση των φαινομένων, οι οποίες προτείνουν τη λήψη μέτρων, με λιγότερη ή περισσότερη κάθε φορά επιτυχία.

Η κύρια αιτία εκδήλωσης για πάνω από 120 περιπτώσεις κατολισθήσεων, σε όλη την έκταση της περιοχής της μελέτης, όπως προαναφέρθηκε, οφείλονται κυρίως στους ακόλουθους λόγους: (1) Στην παρουσία γεωλογικών σχηματισμών με μειωμένες τιμές γεωμηχανικών μεγεθών με αποτέλεσμα τη ν ευκολότερη μετάθεση των μαζών. (2) Στην αλληλουχία των γεωλογικών σχηματισμών, τόσο στρωματογραφική όσο και πλευρική, η οποία έχει δημιουργήσει μια μεγάλη ετερογένεια στις υπό μετακίνηση κυρίως ιζηματογενείς μάζες. (3) Στις διαδικασίες έντονης αποσάθρωσης και διάβρωσης, οι οποίες μειώνουν ακόμα περισσότερο τους γεωμηχανικούς δείκτες. (4) Στην έντονη τεκτονική καταπόνηση η οποία δημιουργεί επιπλέον επιφάνειες ασυνέχειας και τομείς μειωμένης συνοχής των πετρωμάτων. (5) Στις εντατικές βροχοπτώσεις. (6) Στην αποψίλωση εξαιτίας αλλαγών χρήσεων γης και πυρκαγιών και (7) στις μεγάλες τιμές σεισμικών επιταχύνσεων κατά τη διάρκεια μεγάλων σεισμών.

Ειδικά στην τελευταία περίπτωση οι μετακινήσεις μαζών ενισχύουν σημαντικά τις ήδη μεγάλες βλάβες που προκαλούνται και σε ορισμένες περιπτώσεις όταν λαμβάνουν χώρα κατά μήκος οδικών αρτηριών, αποκόπτουν σημαντικές περιοχές από την επικοινωνία ενισχύοντας ακόμα περισσότερο τις επιπτώσεις.

Η αναζήτηση του ιστορικού κατολισθητικών φαινομένων πραγματοποιήθηκε κυρίως στα αρχεία των επίσημων φορέων (Νομαρχία Ηλείας/ Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών, Περιφέρεια Δυτικής Ελλάδος) και στα αρχεία του Ι.Γ.Μ.Ε. Παράλληλα, μεγάλος αριθμός γεγονότων εντοπίστηκε και σε πολλές επιστημονικές δημοσιεύσεις, καθώς το πρόβλημα των κατολισθήσεων στην δυτική Πελοπόννησο έχει μελετηθεί κατά καιρούς διεξοδικά για την αντιμετώπιση των προβλημάτων.

Τόσο για τον Νομό Ηλείας, όσο και για την δυτική Πελοπόννησο, έχει εκπονηθεί ένας μεγάλος αριθμός μελετών για την διερεύνηση των αιτιών των κατολισθήσεων, αλλά και για την λήψη των απαραίτητων μέτρων περιορισμού των φαινομένων. Στην περιοχή της Ηλείας γίνονται αναφορές για κατολισθητικά φαινόμενα από τις δεκαετίες του '50 και '60, σύμφωνα με τα αρχεία του Ι.Γ.Μ.Ε.

Το έντονο πρόβλημα εδαφικών ασταθειών και κατολισθητικών φαινομένων τα οποία λάμβαναν χώρα σε συγκεκριμένες περιοχές του νομού, οδήγησε κατά την δεκαετία του 1970 στη μεταφορά πέντε οικισμών σε νέες ασφαλέστερες θέσεις. Οι παλιοί και οι νέοι οικισμοί που προέκυψαν φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.2 : Οικισμοί που έχουν μετεγκατασταθεί λόγω κατολισθητικών φαινομένων.

	Παλιός Οικισμός	Νέος Οικισμός
1	Πέρσαινα	Νέα Πέρσαινα
2	Πουρνάρι	Πελόπιο, Πλάτανος
3	Πλουτοχώρι	Πλουτοχώρι (νέος οικισμός)
4	Σκιλλουντία	Νέα Σκιλλουντία
5	Λαδικό	Καλλίκωμο
6	Φρίζα	Δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμη η μετεγκατάσταση

Εκτός της εμφάνισης των φαινομένων στους οικισμούς, προβλήματα προκαλούνται συχνά και σε έργα υποδομής, όπως καθιζήσεις οδοστρώματος, καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις σε πρανή του οδικού δικτύου. Σύμφωνα με την Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών του Νομού Ηλείας, τα τμήματα του οδικού δικτύου που εμφανίζουν τα σημαντικότερα προβλήματα είναι τα παρακάτω:

- Κρέστενα – Ανδρίτσεινα
- Οινόη – Περιστέρι
- Πύργος – Καλλίκωμο
- Λέπρεο – Φιγαλεία
- Ζαχάρω – Αρτέμιδα – Μάκιστο - Αρήνη

Ωστόσο, στην παρούσα εργασία δίνεται ιδιαίτερη σημασία στις κατολισθήσεις που καταγράφηκαν την περίοδο 2000 – 2010, καθώς το διάστημα αυτό αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα του αρχείου των διαθέσιμων εικόνων ENVISAT για την περιοχή μελέτης. Για το προαναφερθέν διάστημα έχουν συνταχθεί από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών γεωλογικές – τεχνικογεωλογικές μελέτες για την οριοθέτηση περιοχών κατάλληλων για δόμηση, για τους παρακάτω οικισμούς του Νομού Ηλείας:

- Νεραΐδας Ν. Ηλείας. (1991) Μπέλλας Μ.
- Δ.Δ. Ροδινών Δήμου Ζαχάρως, Ν. Ηλείας (2003) Αντωνόπουλος Μ.
- Λέπρεου, Δήμου Ζαχάρως, Ν. Ηλείας, (2004) Μπέλλας Μ.
- Φρύξας, Ν. Ηλείας, (2004) Μπέλλας Μ.
- Γρύλλου, Δήμου Σκιλλούντος, Ν. Ηλείας, (2004) Μπέλλας Μ.
- Γούμερου, Δήμου Ωλένης Ν. Ηλείας, (2005) Μπέλλας Μ.

- Ωλένας, Δήμου Ωλένης, Ν. Ηλείας, (2005) Μπέλλας Μ.
- Ροδινών, Δήμου Ζαχάρως Ν. Ηλείας, (2005) Μπέλλας Μ.
- Καλού Παιδιού, Δήμου Πηνείας, Ν. Ηλείας, (2005) Μπέλλας Μ.
- Κοτρώνας, Δήμου Πηνείας, Ν. Ηλείας, (2005) Μπέλλας Μ.

Ενώ ακόμη έχουν συνταχθεί και τεχνικογεωλογικές μελέτες για την εξέταση κατολισθητικών φαινομένων επί του οδικού δικτύου Λάλα – Αρχαία Ολυμπία, Δήμου Φολόης, Ν. Ηλείας (Αντωνόπουλος Μ., 2003) και του οδικού δικτύου Λατζοΐου – Νεράιδας, Ηλείας (Νικολάου Ν., 1995).

Σύμφωνα με τους Depountis et al. (2010), από το 1950 έως το 2005 έχουν εντοπιστεί πενήντα οκτώ (58) κατολισθήσεις μέσης και υψηλής ευαισθησίας, τριάντα επτά (37) εκ των οποίων βρίσκονται στις περιοχές που επλήγησαν από τις καταστροφικές πυρκαγιές του 2007. Από τις 58 κατολισθήσεις διερευνήθηκαν ιδιαίτερα οι 46 οι οποίες προϋπήρχαν και επηρεάζουν άμεσα το ανθρωπογενές περιβάλλον. Επιπλέον προσδιορίζονται οι κύριοι τύποι μετακίνησης και οι παράγοντες μετακίνησης βάσει την κατάταξης κατά Varnes.

Πίνακας 4.3: Περιγραφή των κατολισθήσεων που αναγνωρίστηκαν από τους Depountis et al. (2010).

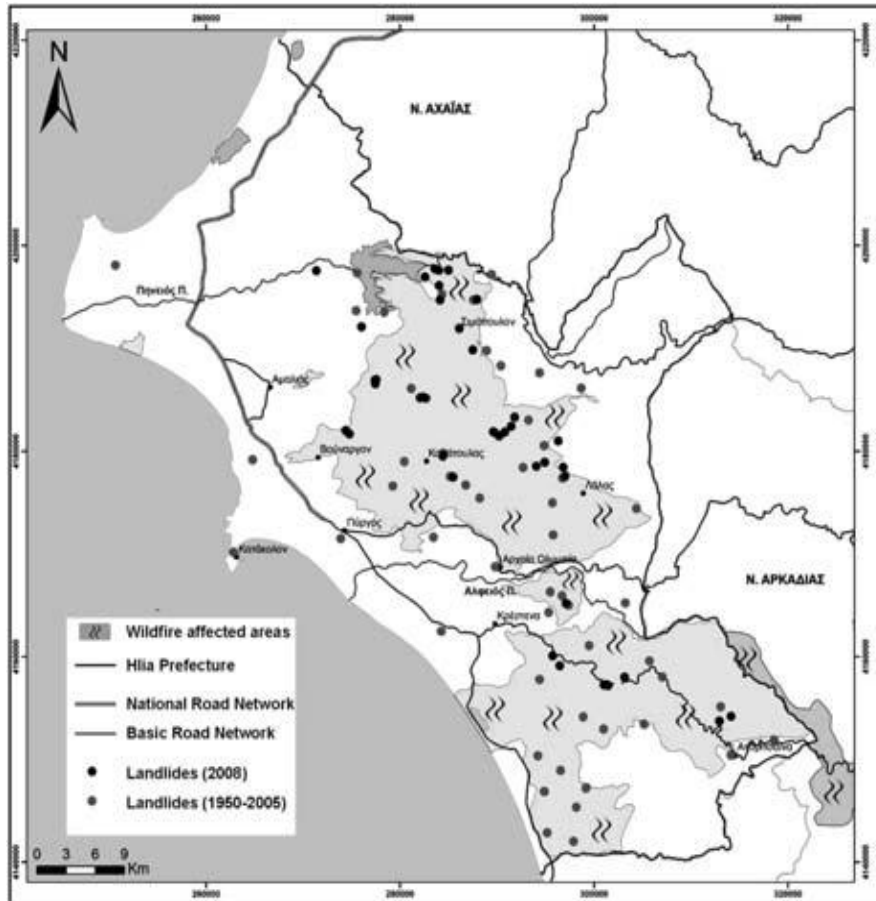
Περιοχή	Τύπος Μετακίνησης	Παράγοντες Μετακίνησης
Αμαλιάδα		
Οικισμός Κεραμιδιά	Ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών/ διάνοιξη
Νότια είσοδος Περιστερίου	Περιστροφική ολίσθηση γαιών - Ερπυσμός	Αποσάθρωση εδαφών
Οικισμός Περιστέρι	Ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών / επιφόρτιση
Δημοτικό Σχολείο Περιστερίου	Ερπυσμός εδάφους	Αποσάθρωση εδαφών
Επαρχιακή οδός Περιστέρι - Οινόη	Ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών / επιφόρτιση / διάνοιξη δρόμου
Τεχνητή λίμνη Πηνειού	Περιστροφική ολίσθηση γαιών	Διάνοιξη δρόμου / Εκσκαφή
Ανδρίτσαινα		
Οικισμός Μύλοι	Καταπτώσεις βράχων	Αποσάθρωση συνεκτικών βράχων
Οικισμός Συκιές	Περιστροφική ολίσθηση γαιών	Ποτάμια διάβρωση
Ιαρθάνου		
Δημοτική Οδός Βούναργου - Φραγκοπηδήματος	Καταπτώσεις βράχων / Ολίσθηση γαιών	Αποσάθρωση μαλακών βράχων/ Απότομες κλίσεις/ Εκσκαφή
Επαρχιακή Οδός Βροχίτσας - Κορυφής	Ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών
Επαρχιακή Οδός Βροχίτσας - Κορυφής	Περιστροφική ολίσθηση γαιών	Αποσάθρωση εδαφών
Πηνεία		

Οικισμός Λάττα	Ολίσθηση και ροή γαιών	Απόσάθρωση εδαφών
Οικισμός Βάλμη	Ολίσθηση γαιών	Απόσάθρωση εδαφών
Δημοτική οδός Βάλμη - Απιδούλα	Ολίσθηση και κατάπτωση γαιών και κορημάτων	Αποσάθρωση εδαφών / διάνοιξη δρόμου
Επαρχιακή Οδός Βάλμη - Ξενιές	Ολίσθηση και κατάπτωση κορημάτων	Αποσάθρωση μαλακών βράχων/ Απότομες κλίσεις/ Εκσκαφή
Επαρχιακή Οδός Βάλμη - Αγραπιδοχώρι	Καταπτώσεις γαιών και κορημάτων	Αποσάθρωση εδαφών/ποτάμια διάβρωση
Είσοδος οικισμού Αγραπιδοχωρίου	Ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών/ διάνοιξη δρόμου
Είσοδος οικισμού Σιμόπουλου	Ερπυσμός εδάφους	Διάνοιξη δρόμου
Οικισμός Άγναντα	Ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών/ απότομες κλίσεις
Οικισμός Κοτρώνας	Ερπυσμός εδάφους	Διάνοιξη χωματόδρομου
Οικισμός Μαζαράκι	Ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών
Οικισμός Καλό Παιδί	Ολίσθηση και ροή γαιών - κατάπτωση κορημάτων	Αποσάθρωση εδαφών / διάνοιξη δρόμου / επιφόρτιση
Σκιλλούντος		
Οικισμός Γραϊκά	Ροές γαιών και κορημάτων	Αποσάθρωση εδαφών
Οικισμός Γρύλος	Ερπυσμός εδάφους	Αποσάθρωση εδαφών
Οικισμός Πλατιάνα	Ολίσθηση και κατάπτωση βράχων - Ολίσθηση γαιών και κορημάτων	Αποσάθρωση συνεκτικών βράχων / απότομες κλίσεις
Δημοτική οδός Πλατιάνας - Αρχαιολογικός χώρος	Ολίσθηση και κατάπτωση βράχων Περιτροφική ολίσθηση γαιών - κατάπτωση κορημάτων	Αποσάθρωση συνεκτικών βράχων/ απότομες κλίσεις/ εκσκαφή
Δημοτική οδός προς Τρυπητή	Περιτροφική ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών/ διάνοιξη
Επαρχιακή Οδός Κρέστενας - Γραϊκά	Περιτροφική ολίσθηση γαιών	Ποτάμια διάβρωση/ διάνοιξη δρόμου
Οικισμός Φρίξα	Περιτροφική ολίσθηση και ροή γαιών - Ολίσθηση γαιών	Αποσάθρωση εδαφών/ποτάμια διάβρωση/ επιφόρτιση
Είσοδος οικισμού Φρίξας	Ολίσθηση γαιών	Αποσάθρωση εδαφών/ εκσκαφή
Ωλένη		
Αγροτική οδός Γούμερου - Ασκητής	Καταπτώσεις βράχων - ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση βράχων / απότομες κλίσεις πρηνών / εκσκαφή
Δημοτική οδός Γούμερου - Αγία Άννα (Βρύση)	Περιτροφική ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών/εκσκαφή
Επαρχιακή Οδός Γούμερου- Αγία Άννα (Κούκος)	Περιτροφική ολίσθηση κορημάτων	Αποσάθρωση εδαφών/εκσκαφή
Είσοδος οικισμού Γούμερου	Ολίσθηση γαιών	Αποσάθρωση εδαφών
Οικισμός Αγία Άννα	Ολίσθηση κορημάτων	Αποσάθρωση εδαφών
Οικισμός Άγιος Γεώργιος	Ολίσθηση γαιών	Αποσάθρωση μαλακών βράχων/επιφόρτιση
Δημοτική οδός Κουτσοχέρας - Μουζακίου	Ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών

Εκκλησία Κουτσοχέρας	Ολίσθηση γαιών	Αποσάθρωση μαλακών βράχων/επιφόρτιση
Δημοτικό Σχολείο Κουτσοχέρας	Ροή γαιών – Ερπυσμός εδάφους	Αποσάθρωση εδαφών/επιφόρτιση
Επαρχιακή οδός Ωλένης - Μαγούλας	Ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών/εκσκαφή
Φολή		
Οικισμός Δούκας	Περιστροφική ολίσθηση και ροή γαιών	Αποσάθρωση εδαφών
Οικισμός Μηλιές	Ροές γαιών και κορημάτων	Αποσάθρωση εδαφών/εκσκαφή
Επαρχιακή Οδός στις πηγές Αύρα	Καταπτώσεις βράχων και κορημάτων	Ποτάμια διάβρωση/ διάνοιξη δρόμου
Οικισμός Νεραϊδας	Ολίσθηση και κατάπτωση βράχων	Αποσάθρωση συνεκτικών βράχων
Οικισμός Νέας Πέρσαινας	Ροή γαιών – Ερπυσμός εδάφους	Αποσάθρωση εδαφών

Η κύρια αιτία των μετακινήσεων στις περισσότερες από τις περιπτώσεις ήταν η απώλεια της βλάστησης και των δασών μετά τις καταστροφικές πυρκαγιές. Σε φτωχά εδάφη η καταστροφή του ριζικού συστήματος των φυτών ήταν κρίσιμη, αποσταθεροποίησε τα ήδη εύθραυστα πρανή και οδήγησε σε κατολισθήσεις.

Κύρια αιτία της εκ νέου ενεργοποίησης προϋπαρχόντων κατολισθήσεων ήταν, είτε η έντονη βροχόπτωση ή σε ορισμένες περιπτώσεις ο συνδυασμός των βροχοπτώσεων και της σεισμικής δραστηριότητας.



Εικόνα 4.2: Κατολισθήσεις εντός των πυρόπληκτων περιοχών σύμφωνα με τους Depountis et al. (2010).

Όσον αφορά τις άλλες αιτίες της κίνησης, σύμφωνα με τον Πίνακα ήταν η αποσάθρωση του εδάφους που οφείλεται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, καθώς και:

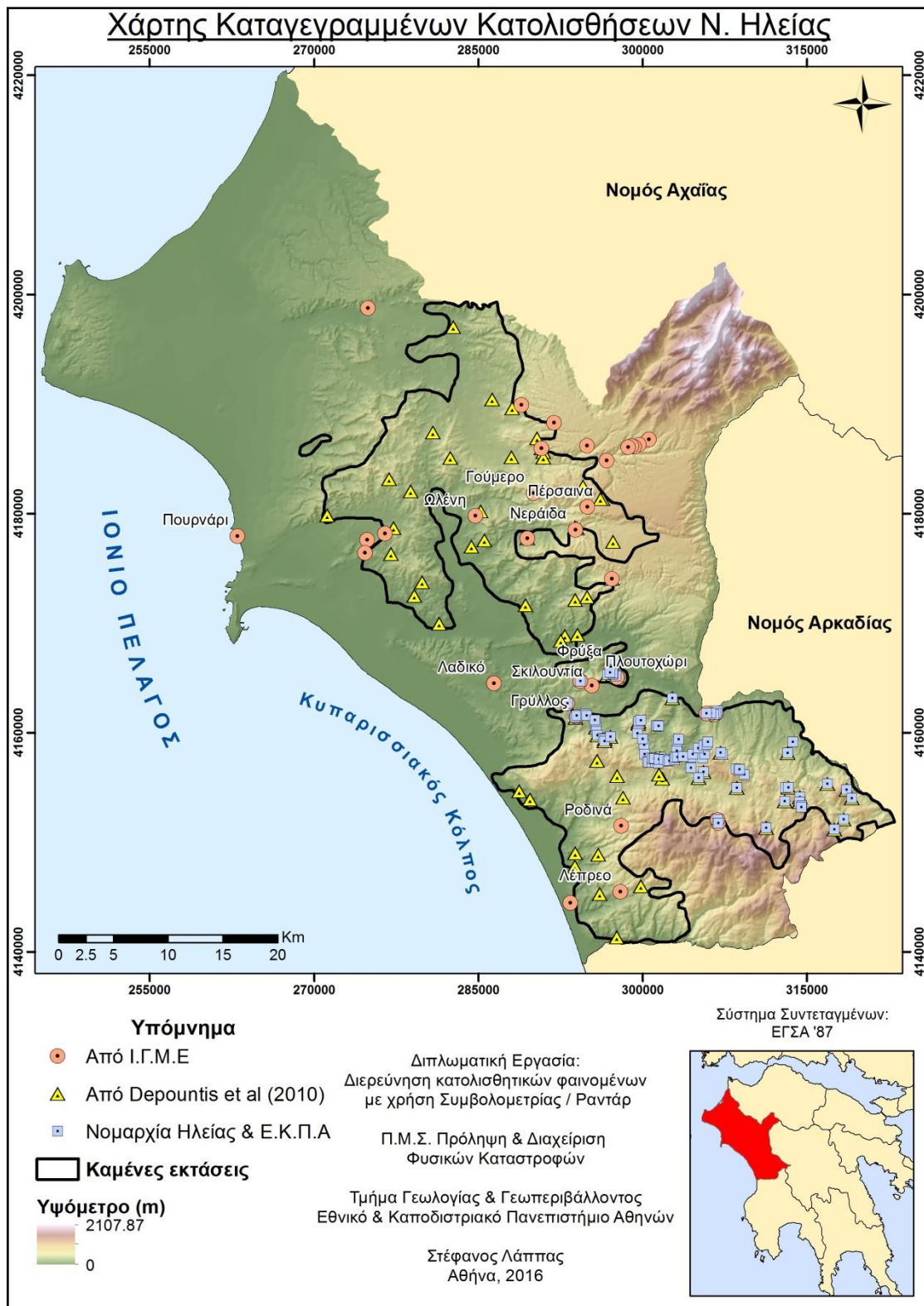
- Οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως, η αποψίλωση εκτάσεων για την επέκταση καλλιεργειών και η εκσκαφή στη βάση των πρανών με σκοπό τη διάνοιξη δρόμων
- Η παρουσία γεωλογικών σχηματισμών με υποβαθμισμένα γεωμηχανικά χαρακτηριστικά,
- Η αλληλουχία γεωλογικών σχηματισμών με διαφορετική γεωμηχανική συμπεριφορά κατά την κατακόρυφο και οριζόντια διάσταση,
- Οι διεργασίες αποσάθρωσης και διάβρωσης,
- Η έντονη τεκτονική καταπόνηση
- Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που σημειώνονται στην περιοχή,
- Η σεισμική δραστηριότητα
- Η ποταμιά διάβρωση.

Οι 46 περιπτώσεις των κατολισθήσεων στον Πίνακα 4.3 είναι κυρίως σύνθετου τύπου μετακινήσεις (ανατροπές, ολισθήσεις, ροές) και εξαρτώνται από το γεωλογικό περιβάλλον. Οι ολισθήσεις και οι ροές εδαφών και κορημάτων που επικρατούν, είναι κυρίως σε Νεογενή ιζήματα, ενώ οι καταπτώσεις κορημάτων είναι από θραύσματα ασβεστολίθων και ψαμμιτών.

Όλες οι κατολισθήσεις μπορούν εύκολα να προκληθούν από έντονες βροχοπτώσεις ή από σεισμική δραστηριότητα όπως στην εν λόγω περιοχή. Το γεωλογικό περιβάλλον της περιοχής, σε συνδυασμό με την απώλεια της βλάστησης μετά τις καταστροφικές πυρκαγιές, η αποψίλωση των δασών και οι έντονες βροχοπτώσεις, συμβάλλουν στην επιδείνωση του προβλήματος της κατολίσθησης.

Τέλος, πρέπει να αναφερθούν οι κατολισθήσεις που συνέβησαν εξαιτίας της σεισμικής δόνησης 2008 στην Ανδραβίδα.

Ο σεισμός της Αχαΐας – Ηλείας (Μ6.5, 8 Ιουνίου 2008) διέγειρε έναν αριθμό κατολισθήσεων, καταπτώσεων και ανατροπών βραχωδών τεμαχών στην πλειοσειστη περιοχή του σεισμού. Οι εδαφικές ή βραχώδεις αστοχίες που συνέβησαν ως αποτέλεσμα του κύριου σεισμού εντοπίζονται κυρίως στην επικεντρική περιοχή του σεισμού (χωριά Βάλμη, Πόρτες και Σαντομέρι) ενώ άλλη μία κατολίσθηση εντοπίστηκε σχεδόν στην άκρη της διάρρηξης του ρήγματος όπως αυτή καθορίστηκε από την κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών.



Χάρτης 4.8: Ιστορικό κατολισθητικών συμβάντων στο Νομό Ηλείας.

Τα χωριά Σαντομέρι και Πόρτες βρίσκονται στο ήπιο μέρος των φυσικών πρανών τα οποία αποτελούνται από φλύσχη με ορίζοντες ψαμμίτη και κροκαλοπαγών, ενώ πάνω από αυτά υπάρχουν φυσικά, απόκρημνα πρανή. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκαν ανατροπές ασβεστολιθικών τεμαχίων ως αποτέλεσμα του δυσμενούς συνδυασμού της μεγάλης κλίσης των πρανών με τις σχεδόν κατακόρυφες εφελκυστικές ρηγματώσεις και ελαφρά κλίση της στρώσης των ασβεστόλιθων, ικανοποιώντας τις κινηματικές συνθήκες ανατροπής τους. Εκτιμάται ότι η συνδυασμένη δράση των οριζοντίων και κατακόρυφων συνιστωσών της σεισμικής κίνησης υπήρξε η αιτία των παραπάνω αστοχιών.

Κατά μήκος του δρόμου που συνδέει τα χωριά Πόρτες και Βάλμη, κοντά στη Βάλμη, παρατηρήθηκε ένας σύνθετος τύπος ολίσθησης σε μία γεωλογική ενότητα που ονομάζεται «σηματισμός Βάλμης». Η γεωλογική αυτή ενότητα αποτελείται από εναλλαγές αργιλικών, ιλυωδών και αμμωδών σχηματισμών με στερεοποιημένα και μη κροκαλοπαγή. Σημαντικές ποσότητες πλευρικών κορημάτων μαζί με τμήματα ασθενών βραχωδών σχηματισμών κατέλαβαν μερικώς το οδόστρωμα.

Στα πρανή όπου παρατηρήθηκε η συγκεκριμένη κατολίσθηση, εκτιμάται ότι ένας μηχανισμός αποκόλλησης των βραχωδών τεμαχίων εξαιτίας της ισχυρής εδαφικής κίνησης (οριζόντιας και κατακόρυφης) διέγειρε την συγκεκριμένη αστάθεια του πρανούς. Ο μηχανισμός αυτός αναπτύχθηκε πιθανώς εξαιτίας των προϋπαρχόντων σχεδόν κατακόρυφων ρηγματώσεων ή στρώσεων μειωμένης αντοχής της βραχομάζας. Μετά την αποκόλληση και την κύλιση στο σχετικά ήπιο πρανές, τα βραχώδη τμήματα σταδιακά μετατράπηκαν σε κορήματα εξαιτίας των χαμηλών τιμών των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

5.1 Δεδομένα SAR απεικονίσεων

Για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα SAR και ASAR του δορυφόρου Ραντάρ ENVISAT αντίστοιχα.

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν, αποτελούν εικόνες αρχείου οι οποίες παρέχονται από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος. Η επιλογή τους, πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του λογισμικού EOLi (<http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>) και καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή της Δυτικής Πελοποννήσου. Συνολικά, επιλέχθηκαν 62 SAR απεικονίσεις, καλύπτοντας το χρονικό διάστημα 2002 – 2010. Από το σύνολο των απεικονίσεων οι 27 προέρχονται από την ανοδική τροχιά (ascending) του δορυφόρου και οι 35 από την καθοδική (descending).

Τα δεδομένα ήταν SLC (Single Look Complex) απεικονίσεις (πλάτος και φάση σήματος οπισθοσκέδασης), καθοδικής τροχιάς, νυχτερινής λήψης (περίπου στις 09:00 π.μ.), κάθετης (VV) πόλωσης και πλάτους κάλυψης 100 km. Επιπλέον, για την διασφάλιση της συμβατότητας των δεδομένων, οι λήψεις των απεικονίσεων προέρχονται από το ίδιο κέντρο επεξεργασίας, το Ιταλικό κέντρο επεξεργασίας I-PAF (Italian Processing and Archiving Facility).

Η μετατροπή των εικόνων από πρωτογενή δεδομένα (raw) σε SLC είναι μια απαραίτητη διαδικασία. Λόγω της χρήσης του Doppler για τη δημιουργία μεγάλου μήκους κεραίας, διαβιβάζονται διαδοχικοί παλμοί από το RADAR προς κάθε στόχο, με αποτέλεσμα το σήμα που λαμβάνεται από αυτόν, να είναι διασκορπισμένο κατά μήκος της γραμμής πτήσης. Αυτό επηρεάζει την ποιότητα της εικόνας raw, με επακόλουθο να εμφανίζεται θολή. Η μετατροπή της εικόνας, έχει ως σκοπό να συλλέξει το σήμα μιας περιοχής, που είναι διασκορπισμένο σε πολλά εικονοστοιχεία της εικόνας raw, σε ένα μοναδικό εικονοστοιχείο της εικόνας SLC.

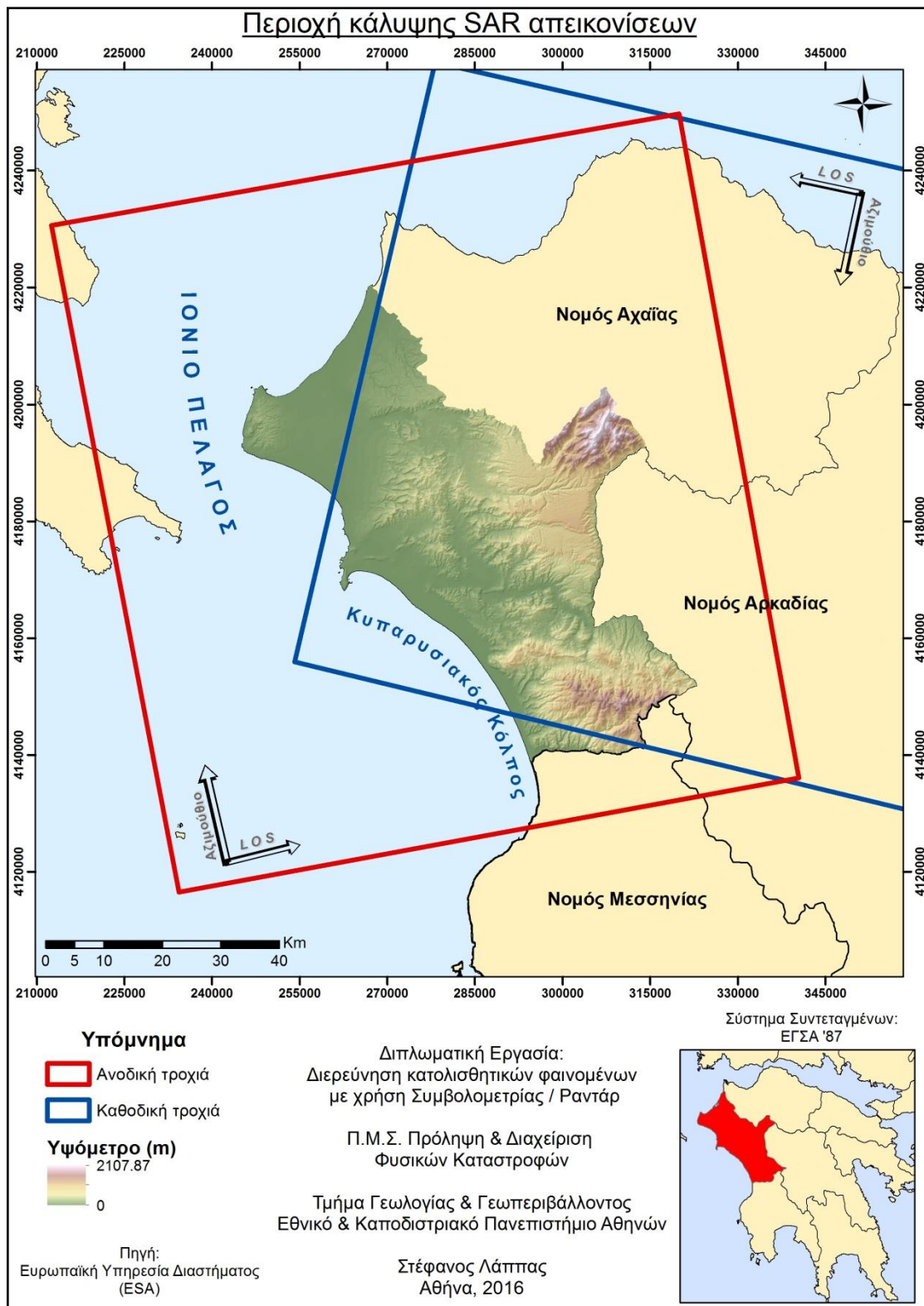
Για να γίνει η εκτέλεση αυτής της διαδικασίας πρέπει η εικόνα να χωριστεί σε επιμέρους τμήματα (patches). Για κάθε ένα από αυτά τα παράθυρα θα υπάρχουν κάποιες γραμμές στην αρχή και στο τέλος όπου δε θα εμφανίζεται όλο το εύρος του Doppler. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί αν αλληλεπικαλυφθούν τα όμορα παράθυρα και σαν αποτέλεσμα, να δοθούν μόνο αυτές οι γραμμές οι οποίες εμφανίζουν όλο το εύρος του Doppler.

Πίνακας 5.1: Δεδομένα SAR απεικονίσεων ανοδικής τροχιάς

A/A	Ημερομηνία λήψης	Orbit	Track	Πόλωση
1	17/11/2002	3747	186	VV
2	6/4/2003	5751	186	VV
3	11/5/2003	6252	186	VV
4	20/7/2003	7254	186	VV
5	28/9/2003	8256	186	VV
6	7/12/2003	9258	186	VV
7	11/1/2004	9759	186	VV
8	15/2/2004	10260	186	VV
9	25/4/2004	11262	186	VV
10	30/5/2004	11763	186	VV
11	4/7/2004	12264	186	VV
12	8/8/2004	12765	186	VV
13	12/9/2004	13266	186	VV
14	30/1/2005	15270	186	VV
15	19/2/2006	20781	186	VV
16	9/7/2006	22785	186	VV
17	31/12/2006	25290	186	VV
18	4/2/2007	25791	186	VV
19	15/4/2007	26793	186	VV
20	16/12/2007	30300	186	VV
21	30/3/2008	31803	186	VV
22	13/7/2008	33306	186	VV
23	17/8/2008	33807	186	VV
24	21/9/2008	34308	186	VV
25	26/10/2008	34809	186	VV
26	30/11/2008	35310	186	VV
27	19/4/2009	37314	186	VV

Πίνακας 5.2: Δεδομένα SAR απεικονίσεων καθοδικής τροχιάς

A/A	Ημερομηνία λήψης	Orbit	Track	Πόλωση
1	20/10/2002	3339	279	VV
2	9/3/2003	5343	280	VV
3	22/6/2003	6846	281	VV
4	9/11/2003	8850	282	VV
5	28/3/2004	10854	283	VV
6	11/7/2004	12357	284	VV
7	6/2/2005	15363	285	VV
8	13/3/2005	15864	286	VV
9	17/4/2005	16365	287	VV
10	22/5/2005	16866	288	VV
11	4/9/2005	18369	289	VV
12	13/11/2005	19371	290	VV
13	26/2/2006	20874	291	VV
14	11/6/2006	22377	292	VV
15	16/7/2006	22878	293	VV
16	29/10/2006	24381	294	VV
17	11/2/2007	25884	295	VV
18	5/8/2007	28389	296	VV
19	6/4/2008	31896	297	VV
20	11/5/2008	32397	298	VV
21	20/7/2008	33399	299	VV
22	24/8/2008	33900	300	VV
23	28/9/2008	34401	301	VV
24	2/11/2008	34902	302	VV
25	7/12/2008	35403	303	VV
26	15/2/2009	36405	304	VV
27	22/3/2009	36906	305	VV
28	26/4/2009	37407	306	VV
29	31/5/2009	37908	307	VV
30	13/9/2009	39411	308	VV
31	22/11/2009	40413	309	VV
32	27/12/2009	40914	310	VV
33	7/3/2010	41916	311	VV
34	11/4/2010	42417	312	VV
35	20/6/2010	43419	313	VV



Χάρτης 5.1: Περιοχή κάλυψης SAR απεικονίσεων.

5.2 Μεθοδολογία Παραγωγής Διαφορικού Συμβολογραφήματος (GAMMA DInSAR)

Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι υπηρεσίες GAMMA DInSAR και SBAS της ESA. Οι υπηρεσίες αυτές εντάσσονται στην διαδικτυακή πλατφόρμα Grid Processing On Demand – G-POD της ESA. Για την χρησιμοποίηση των υπηρεσιών της πλατφόρμας απαιτείται η δημιουργία λογαριασμού, κατόπιν έγκρισης από την ομάδα διαχείρισης της πλατφόρμας. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της πλατφόρμας είναι ότι αξιοποιεί τους μεγάλους υπολογιστικούς πόρους της ESA, οι οποίοι σε διαφορετική περίπτωση δεν θα ήταν διαθέσιμοι σε απλούς χρήστες. Αυτό δίνει την δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Επιπλέον χάριν στις ημι-αυτοματοποιημένες υπηρεσίες που εμπεριέχονται στην πλατφόρμα δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής μεθόδων διαφορικής συμβολομετρίας από χρήστες με βασικές γνώσεις. Επίσης, δεν απαιτείται η συνεχής επίβλεψη των διαδικασιών, παρά μόνο κατά την εισαγωγή των δεδομένων και τον ορισμό των παραμέτρων. Μόλις ολοκληρωθούν επιτυχώς οι υπηρεσίες, ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει στον προσωπικό του υπολογιστή τα αποτελέσματα και να συνεχίσει την περαιτέρω ανάλυση αυτών.

Η μεθοδολογία τόσο για την τεχνική της σώρευσης συμβολογραφημάτων, όσο και για την τεχνική μικρού ανύσματος βάσης είναι σχεδόν οι ίδιες μέχρι το σημείο παραγωγής συμβολογραφημάτων. Μετά διαφοροποιούνται οι τεχνικές στην μέθοδο που αξιοποιούν τα διαφορικά συμβολογραφήματα. Η κυριότερη διαφορά είναι ότι στην τεχνική του μικρού ανύσματος βάσης είναι απαραίτητη η εκτύλιξη φάσης (phase unwrapping), ενώ για την σώρευση συμβολογραφημάτων χρησιμοποιούνται κατευθείαν τα διαφορικά συμβολογραφήματα (unwrapped interferograms). Επίσης, μια ακόμη καίρια διαφορά των δύο τεχνικών είναι στην επιλογή της κύριας εικόνας (master image), βάσει της οποίας πραγματοποιείται η συμπροσαρμογή (co-registration) με την δευτερεύουσα εικόνα (slave image).

Αρχικά για την παραγωγή των διαφορικών συμβολογραφημάτων χρησιμοποιήθηκε η υπηρεσία GAMMA DInSAR της πλατφόρμας G-POD. Η υπηρεσία αυτή δομείται από ένα ολοκληρωμένο αλγόριθμο δημιουργίας διαφορικών συμβολογραφημάτων, ακολουθώντας όλα τα απαραίτητα βήματα. Ο χρήστης αρχικά επιλέγει την περιοχή ενδιαφέροντος (Area Of Interest – AOI) και τις SAR απεικονίσεις του ENVISAT που θα χρησιμοποιηθούν. Στην συνέχεια ορίζει τις απαιτούμενες παραμέτρους και υποβάλλει αίτημα επεξεργασίας. Πρέπει να σημειωθεί οι παράμετροι έχουν οριστεί εκ των προτέρων από την ομάδα δημιουργίας της υπηρεσίας και θεωρούνται οι βέλτιστες. Χρήστες με προχωρημένη γνώση συμβολομετρίας καλούνται να διαφοροποιήσουν τις παραμέτρους αυτές και δεν συνίσταται στους απλούς χρήστες.

Παρακάτω ακολουθούν αναλυτικά τα βήματα της διαδικασίας για την δημιουργία των διαφορικών συμβολογραφημάτων, όπως εκτελούνται από την υπηρεσία GAMMA DInSAR. Στις περιπτώσεις όπου θεωρήθηκε χρήσιμο να διαφοροποιηθούν οι παράμετροι περιγράφεται η διαδικασία, καθώς και ο λόγος διαφοροποίησης.

Processing Parameters

Use the Bounding Box for subsetting the SAR master product

General

Perform only coregistration

Use advanced parameters

Number of looks in range for coregistration and interferograms

Number of looks in azimuth for coregistration and interferograms

Data preparation

Number of state vectors to generate from DELFT orbit files (>=15)

Time interval between DELFT state vectors in the ISP image parameter file (s)

Number of state vectors to extract from DORIS orbit files

Coregistration

Master: no master file selected. Double click on one product to select it as master

Type:

Center of patch in range (samples) for initial offset estimation (- for image center)

Center of patch in azimuth (lines) for initial offset estimation (- for image center)

Output image sample spacing in meters for UTM projection

Algorithm selection for regions of layover, shadow, or DEM gaps

Range over-sampling parameter for gc_map parameter (Nearest neighbor thinned algorithm)

Interpolation oversampling factor in geocode

Maximum interpolation search radius in geocode

DInSAR

Process type

Baseline refinement

Minimum magnitude of bperp (m) (- for all)

Maximum magnitude of bperp (m) (- for all)

Minimum number of days between passes

Maximum number of days between passes (- for all)

Maximum scene number difference between passes (- for all)

Correlation estimation window range and azimuth size (linear weighting) in pixels

Baseline flag

Apply range spectral shift filtering

Apply azimuth common-band filtering

Exponent parameter for adf interferogram filter (nominal range 0.2-->1.0)

Window size for adf filter

Range and azimuth filter step size

Phase unwrapping

Threshold for correlation based unwrapping mask (0.0 --> 1.0)

Threshold for relative intensity based unwrapping mask (0.0 --> 1.0)

Number of looks in range and azimuth to scale before unwrapping

Phase reference range offset

Phase reference azimuth offset

MCF triangulation mode

Displacement mode

Interpolation mode

Data value per color cycle

Εικόνα 5.1: Επιλογή παραμέτρων υπηρεσίας GAMMA DInSAR.

Multilooking

Οι εικόνες SLC (single look complex) χρησιμοποιούνται σαν βάση για τη δημιουργία των εικόνων πολλαπλών παρατηρήσεων (multi-look images – MLI). Οι multi-look εικόνες δημιουργούνται εφαρμόζοντας ένα φίλτρο μέσης τιμής στις SLC εικόνες. Υπολογίζεται έτσι ο μέσος όρος των διάφορων διαδοχικών εικονοστοιχείων μίας εικόνας SLC στην διεύθυνση των αποστάσεων και στη διεύθυνση του αζιμούθιου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται multilooking. Ο αριθμός των looks μίας εικόνας ML αντιστοιχεί στον μέσο όρο των εικονοστοιχείων.

Ένα τυπικό μέγεθος παραθύρου φίλτρου μέσης τιμής είναι 5x1, που σημαίνει ότι η τιμή του νέου εικονοστοιχείου της εικόνας που προκύπτει από το μέσο όρο πέντε εικονοστοιχείων στο αζιμούθιο και ενός εικονοστοιχείου στην απόσταση. Η τελική εικόνα MLI είναι 5-looks. Οι multilook εικόνες χρησιμοποιούνται σαν αναφορά στα επόμενα βήματα της συμβολομετρίας, ιδιαίτερα για την εγγραφή των SLC εικόνων μεταξύ τους. Το πλεονέκτημα των εικόνων πολλαπλών παρατηρήσεων είναι ότι εμφανίζουν μικρότερα στίγματα και λιγότερο θόρυβο, αλλά έχουν μικρότερη ανάλυση.

Τροχιακά Δεδομένα (Orbits)

Για να μπορέσει να εφαρμοστεί η μέθοδος της συμβολογραφίας απαιτούνται οι ακριβείς τροχιές των δορυφόρων κατά τις λήψεις των εικόνων. Τα τροχιακά δεδομένα χρησιμεύουν στην εγγραφή (coregistration) των δύο εικόνων μεταξύ τους και με το DEM της περιοχής αξιοποιώντας την ακριβή θέση του δορυφόρου κατά την λήψη των εικόνων. Παράλληλα, τυχόν μετατόπιση στην τροχιά συμβάλλει στην δημιουργία θορύβου στο συμβολογράφημα, ο οποίος αφαιρείται εύκολα αν είναι γνωστές οι ακριβείς θέσεις των δορυφόρων.

Τα δεδομένα αυτά παρέχονται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστήματος (European Space Agency, ESA) και αποτελούν ακριβή δεδομένα θέσης και ταχύτητας του δορυφόρου ανά τακτικά χρονικά διαστήματα μερικών δευτερολέπτων. Για τον δορυφόρο ENVISAT, ελήφθησαν τα τροχιακά δεδομένα DORIS. Το DORIS είναι ένα όργανο, το οποίο είναι εγκατεστημένο πάνω στον δορυφόρο, κάτι που σαφώς ευνοεί και επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια στα δεδομένα των τροχιών. Στην υπηρεσία GAMMA DInSAR DEV τα τροχιακά δεδομένα ανακτώνται αυτόματα.

Συμπροσαρμογή εικόνων (coregistration)

Η διαδικασία εγγραφής αφορά τον υπολογισμό των μετατοπίσεων που έχουν η μία εικόνα ως προς την άλλη, τόσο κατά τη διεύθυνση της τροχιάς, όσο και κάθετα σε αυτήν. Εφόσον ο δορυφόρος δεν περνάει ακριβώς από την ίδια θέση, είναι αναμενόμενο η λήψη να μην αφορά ακριβώς την ίδια γεωγραφική περιοχή, αλλά να υπάρχει μία μικρή απόκλιση.

Η ακρίβεια της συμπροσαρμογής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας. Κατά την συμπροσαρμογή πραγματοποιείται εγγραφή μίας SAR απεικόνισης (δευτερεύουσα απεικόνιση, slave image) σε μία άλλη που λαμβάνεται ως αναφορά (κύρια ή πρωτεύουσα απεικόνιση, master image). Η διαδικασία περιλαμβάνει ουσιαστικά δύο στάδια, την μεταβολή της θέσης κάθε εικονοστοιχείου της δευτερεύουσας εικόνας βάσει της πρωτεύουσας εικόνας και ο εκ νέου υπολογισμός του πλάτους και της φάσης του σήματος για το σύνολο των εικονοστοιχείων στις νέες θέσεις με παρεμβολή.

Απαραίτητη είναι η επιλογή της βέλτιστης εικόνας αναφοράς (master) βάσει της οποίας θα εγγραφούν οι υπόλοιπες. Συνήθως για κάθε συμβολογράφημα επιλέγεται διαφορετική κύρια εικόνα, δεδομένου ότι τα διαφορετικά ζεύγη έχουν διαφορετικό άνυσμα βάσης. Στην παρούσα εργασία όμως επιλέχθηκε μία κοινή κύρια εικόνα. Η επιλογή μίας κύριας εικόνας προσφέρει το πλεονέκτημα ότι οι περιοχές με γεωμετρικές παραμορφώσεις (σμίκρυνση, πτύχωση, σκίαση) θα είναι ίδιες σε όλα τα γραφήματα.

Τα κριτήρια βάση των οποίων επιλέχθηκε αυτή η εικόνα αναφοράς ήταν α) το ελάχιστο δυνατό μέσο άνυσμα βάσης, β) η λήψη της εικόνας να βρίσκεται περίπου στο μέσο της χρονικής περιόδου που καλύπτουν οι SAR απεικονίσεις και τέλος γ) η εικόνα αυτή να μην παρουσιάζει ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Για την επιλογή της εικόνας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SNAP της ESA, καθώς περιέχει ένα εργαλείο για τον εύρεση της βέλτιστης εικόνας αναφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω κριτήρια. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η κύρια εικόνα που επιλέχθηκε, καθώς και το άνυσμα βάσης των δευτερευόντων εικόνων.

Η ακριβής συμπροσαρμογή υλοποιείται λαμβάνοντας υπ' όψιν ως κριτήρια παραμέτρους όπως η συνάφεια, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) και οι τοπικές διακυμάνσεις της φάσης. Ο κατά προσέγγιση προσδιορισμός της μετατόπισης μεταξύ των απεικονίσεων πραγματοποιείται βάσει των τροχιακών δεδομένων. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο, για την εγγραφή των δύο εικόνων χρησιμοποιείται και το DEM της περιοχής, προσφέροντας ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Η υπηρεσία GAMMA DInSAR προσφέρει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί SRTM 4^{ns} έκδοσης ανάλυσης 90 μέτρων, για την καλύτερη συμπροσαρμογή των εικόνων.

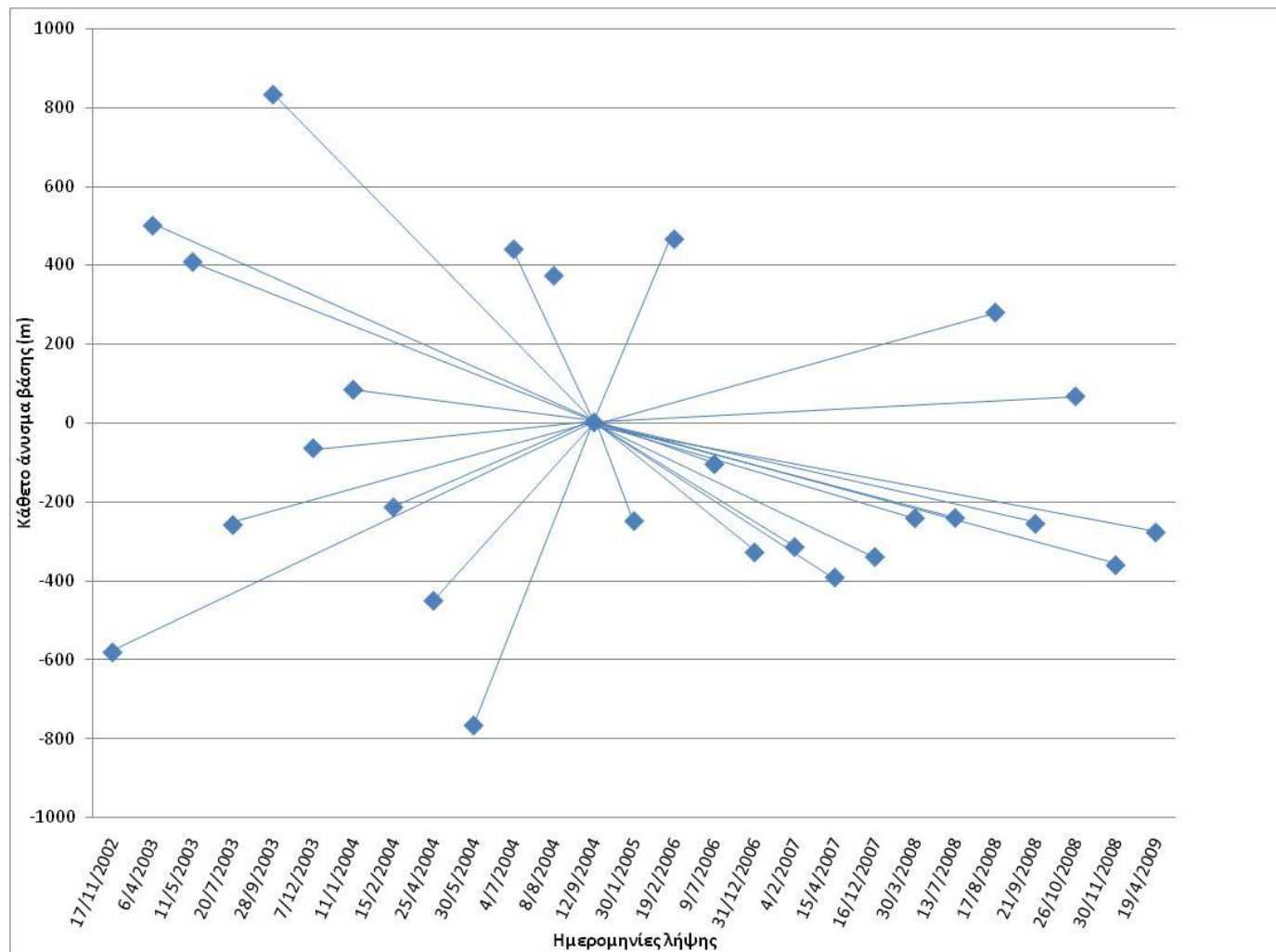
Κατά την διαδικασία της συμπροσαρμογής δημιουργούνται πλέγματα (grids) τα οποία τεμαχίζουν τις δύο εικόνες σε παράθυρα σταθερών διαστάσεων εικονοστοιχείων. Κάθε παράθυρο της κύριας εικόνας συγκρίνεται με τα παράθυρα της δευτερεύουσας χρησιμοποιώντας τις τιμές έντασης, και τελικά ταυτίζεται με εκείνο με το οποίο έχει την μεγαλύτερη συσχέτιση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλη την έκταση των εικόνων, και τελικά η δευτερεύουσα εικόνα ανακατασκευάζεται έτσι ώστε να ταυτίζεται επακριβώς με την κύρια.

Πίνακας 5.3: Επιλογή κύριας εικόνας (με κόκκινο) των δεδομένων ανοδικής τροχιάς.

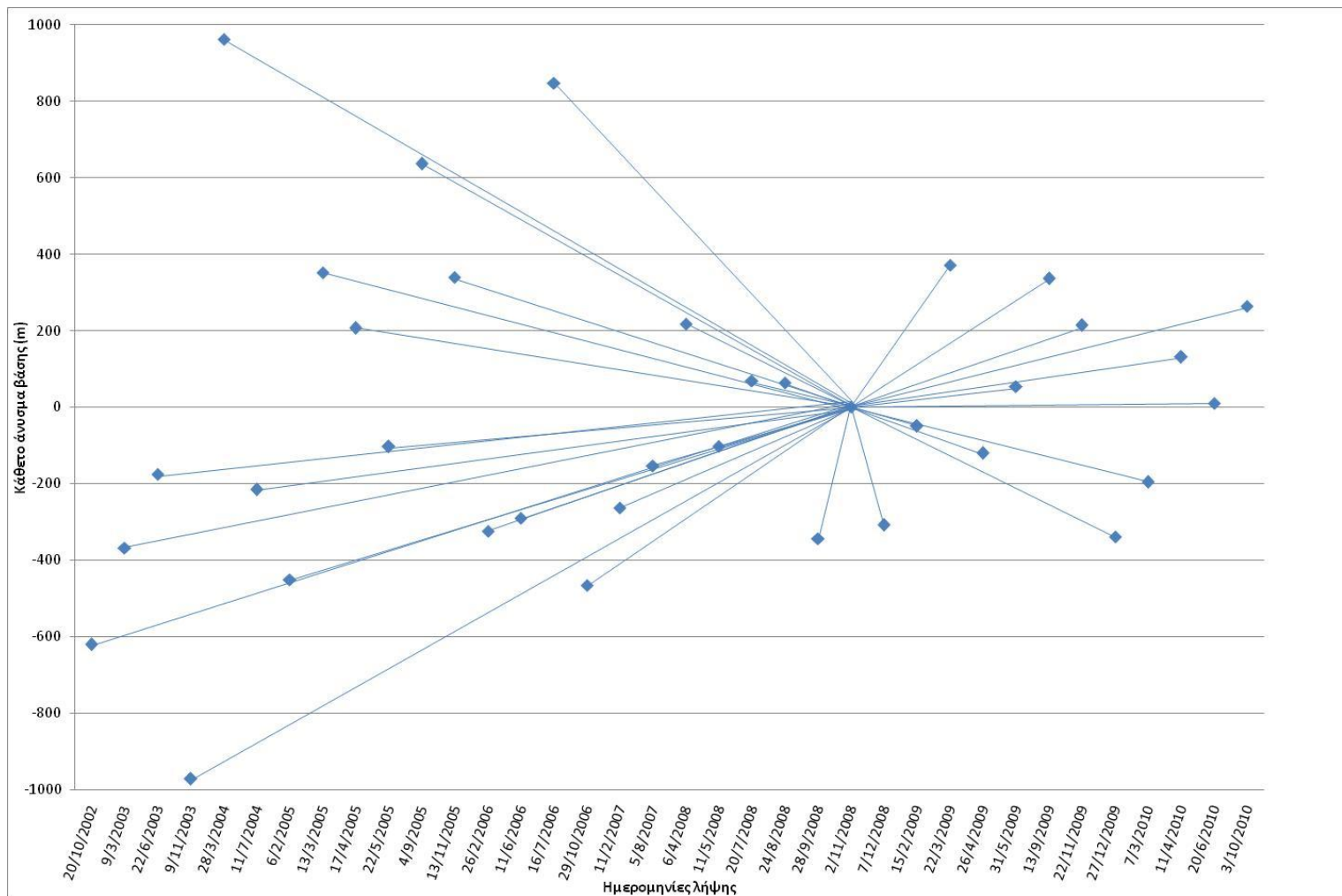
A/A	Ημερομηνία λήψης	Τροχιά (Orbit)	Διαδρομή (Track)	Άνυσμα Βασης (Bper) (m)	Χρονικό διάστημα (Btem) (days)
1	17/11/2002	3747	186	-583	665
2	6/4/2003	5751	186	498.72	525
3	11/5/2003	6252	186	406.64	490
4	20/7/2003	7254	186	-260	420
5	28/9/2003	8256	186	830.67	350
6	7/12/2003	9258	186	-65.29	280
7	11/1/2004	9759	186	82.95	245
8	15/2/2004	10260	186	-215	210
9	25/4/2004	11262	186	-452	140
10	30/5/2004	11763	186	-768	105
11	4/7/2004	12264	186	438.71	70
12	8/8/2004	12765	186	371.66	35
13	12/9/2004	13266	186	0	0
14	30/1/2005	15270	186	-250	-140
15	19/2/2006	20781	186	464.42	-525
16	9/7/2006	22785	186	-106	-665
17	31/12/2006	25290	186	-329.28	-840
18	4/2/2007	25791	186	-316	-875
19	15/4/2007	26793	186	-393	-945
20	16/12/2007	30300	186	-341	-1190
21	30/3/2008	31803	186	-242.92	-1295
22	13/7/2008	33306	186	-242	-1400
23	17/8/2008	33807	186	278.45	-1435
24	21/9/2008	34308	186	-257	-1470
25	26/10/2008	34809	186	66.11	-1505
26	30/11/2008	35310	186	-362	-1540
27	19/4/2009	37314	186	-279	-1680

Πίνακας 5.4: Επιλογή κύριας εικόνας (με κόκκινο) των δεδομένων καθοδικής τροχιάς

A/A	Ημερομηνία λήψης	Τροχιά (Orbit)	Διαδρομή (Track)	Άνυσμα Βασης (Bper) (m)	Χρονικό διάστημα (Btem) (days)
1	20/10/2002	3339	279	-620	2205
2	9/3/2003	5343	280	-368	2065
3	22/6/2003	6846	281	-175	1960
4	9/11/2003	8850	282	-972	1820
5	28/3/2004	10854	283	962.02	1680
6	11/7/2004	12357	284	-215	1575
7	6/2/2005	15363	285	-451	1365
8	13/3/2005	15864	286	351.43	1330
9	17/4/2005	16365	287	206.49	1295
10	22/5/2005	16866	288	-103	1260
11	4/9/2005	18369	289	635.93	1155
12	13/11/2005	19371	290	339.53	1085
13	26/2/2006	20874	291	-324	980
14	11/6/2006	22377	292	-290	875
15	16/7/2006	22878	293	846.99	840
16	29/10/2006	24381	294	-466	735
17	11/2/2007	25884	295	-263	630
18	5/8/2007	28389	296	-153	455
19	6/4/2008	31896	297	217.38	210
20	11/5/2008	32397	298	-102	175
21	20/7/2008	33399	299	68.57	105
22	24/8/2008	33900	300	64.55	70
23	28/9/2008	34401	301	-343	35
24	2/11/2008	34902	302	0	0
25	7/12/2008	35403	303	-308	-35
26	15/2/2009	36405	304	-49.8	-105
27	22/3/2009	36906	305	371.44	-140
28	26/4/2009	37407	306	-120	-175
29	31/5/2009	37908	307	55.02	-210
30	13/9/2009	39411	308	336.5	-315
31	22/11/2009	40413	309	214.31	-385
32	27/12/2009	40914	310	-339	-420
33	7/3/2010	41916	311	-196	-490
34	11/4/2010	42417	312	131.24	-525
35	20/6/2010	43419	313	10.57	-595



Διάγραμμα 5.1: Κάθετο άνωσμα βάσης για κάθε εικόνα από την κύρια, των εικόνων ανοδικής τροχιάς.



Διάγραμμα 5.2: Κάθετο άνυσμα βάσης για κάθε εικόνα από την κύρια, των εικόνων καθοδικής τροχιάς.

Καθορισμός κάθετου ανύσματος βάσης (perpendicular baseline)

Στην υπηρεσία GAMMA DInSAR πριν την δημιουργία του συμβολογραφήματος πραγματοποιείται η εκτίμηση του ανύσματος βάσης (baseline) μεταξύ των δύο εικόνων, καθώς δίνεται η δυνατότητα να επιλεγεί το ανώτατο και το κατώτατο όριο ανύσματος βάσης (maximum & minimum baseline) για όλα τα πιθανά ζεύγη εικόνων.

Ο υπολογισμός του διανύσματος είναι απαραίτητο να προηγηθεί της παραγωγής του συμβολογραφήματος, διότι κρίνει σε μεγάλο βαθμό την καταλληλότητα ή μη ενός ζεύγους εικόνων. Επιπλέον καθορίζει σε ένα βαθμό και την συνάφεια του παραγόμενου συμβολογραφήματος. Για την επιτυχή εκτίμηση του ανύσματος βάσης χρησιμοποιούνται τα τροχιακά δεδομένα των απεικονίσεων, όπου ανακτώνται αυτόματα από την υπηρεσία.

Πολύ μεγάλες τιμές ανύσματος βάσης επιφέρουν μεγάλη μετατόπιση του φάσματος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επικαλυπτόμενη πληροφορία (κοινό μέρος φάσματος) ανάμεσα στις δύο απεικονίσεις. Σ' αυτήν την περίπτωση δεν δύναται να διορθωθεί η μετατόπιση φάσματος με τα κατάλληλα φίλτρα, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Φιλτράρισμα SAR απεικονίσεων (Spectral shift & common band filtering)

Η παρουσία θορύβου στην συμβολομετρική φάση οδηγεί σε προβλήματα κατά την εκτύλιξή της, με άμεσες συνέπειες πολλές φορές στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παρόλο που τα διάφορα είδη θορύβου απεικονίζονται με το ίδιο τρόπο στα συμβολογραφήματα, η γενεσιουργός αιτία μπορεί να είναι τελείως διαφορετική. Λαμβάνοντας το παραπάνω υπόψη, το φιλτράρισμα των δεδομένων SAR πραγματοποιείται με διαφορετικές τεχνικές στα επί μέρους στάδια της επεξεργασίας.

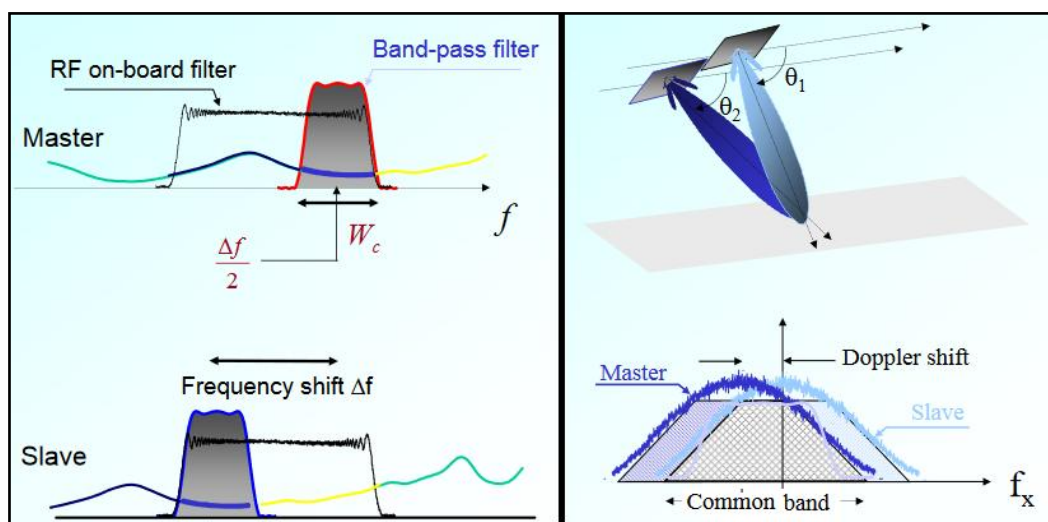
Ο σκοπός του φιλτραρίσματος των εικόνων SAR είναι για την «συμπροσαρμογή» ή συνέλιξης (convolution) της φάσης των δύο απεικονίσεων. Στην ουσία η διαδικασία επεξεργασίας επικεντρώνεται στο διαχωρισμό μεταξύ σήματος και θορύβου στο πεδίο των συχνοτήτων, διατηρώντας το συσχετισμένο μέρος της φάσης και αφαιρώντας το ασυσχέτιστο που αντιστοιχεί σε θόρυβο.

Το φιλτράρισμα πραγματοποιείται χωριστά στις δύο διευθύνσεις μιας απεικόνισης για τη διατήρηση του κοινού μέρους του φάσματος των απεικονίσεων (spectral shift filtering common band filtering).

Η εφαρμογή φίλτρου στην διεύθυνση των αποστάσεων (range) αντιστοιχεί στην διατήρηση του κοινού μέρους του φάσματος των δύο εικόνων. Η διαφορετική γωνία πρόσπτωσης μεταξύ των δύο λήψεων προκαλεί μετατόπιση του φάσματος στην

ανακλαστικότητα (spectral shift). Η μετατόπιση φαίνεται ιδιαίτερα στα διαγράμματα ανακλαστικότητας των δύο εικόνων, όπου είναι εμφανής η διαφορά τους.

Στην διεύθυνση του αζιμούθιου παρατηρείται μια διαφορετική μετατόπιση που οφείλεται στην διαφοροποίηση του κεντροειδούς Doppler (Doppler Centroid) μεταξύ των δύο λήψεων. Η μετατόπιση του φάσματος σ' αυτήν την περίπτωση αφορά την μετατόπιση του ίδιου φάσματος ανακλαστικότητας των δύο εικόνων. Οπότε με την εφαρμογή του φίλτρου και σε αυτήν την περίπτωση διατηρείται μόνο το κοινό μέρος.



Εικόνα 5.2: Εφαρμογή φίλτρου στην διεύθυνση των αποστάσεων και του αζιμούθιου (Rocca, 2015).

Βασικό είναι, η διαδικασία να πραγματοποιηθεί πριν την παραγωγή του συμβολογραφήματος, διότι μετά δεν έχει κανένα αποτέλεσμα. Αν δεν πραγματοποιηθεί πριν, το μη επικαλυπτόμενο μέρος του φάσματος μεταξύ των απεικονίσεων, που αντιστοιχούν ουσιαστικά σε θόρυβο, επιδρά σε όλες τις συχνότητες του συμβολογραφήματος, μειώνοντας την συνάφεια.

Δημιουργία συμβολογραφήματος (Interferogram generation)

Έχοντας εφαρμοστεί το φίλτρο στις εγγεγραμμένες εικόνες SAR, είναι δυνατή η παραγωγή του συμβολογραφήματος. Το συμβολογράφημα είναι το αποτέλεσμα του μιγαδικού πολλαπλασιασμού έκαστου εικονοστοιχείου της κύριας εικόνας με το συζυγές εικονοστοιχείο της εγγεγραμμένης δευτερεύουσας.

Ωστόσο, εκτός της συμβολομετρικής φάσης (διαφορά φάσης μεταξύ των απεικονίσεων) που προκύπτει, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η τιμή του πλάτους στο μιγαδικό συμβολογράφημα, καθώς περιέχει σημαντική πληροφορία για τον λόγο σήματος προς θόρυβο των παρατηρήσεων (signal to noise ratio –SNR).

Στο συγκεκριμένο στάδιο επεξεργασίας υπολογίζεται και απομακρύνεται συνήθως και ο όρος επίπεδης Γης, με αποτέλεσμα την εξομαλυμένη συμβολομετρική φάση (interferogram flattening).

Παραγωγή Διαφορικού Συμβολογραφήματος (Differential Interferogram generation)

Για την δημιουργία του διαφορικού συμβολογραφήματος είναι απαραίτητο να αφαιρεθεί η φάση της τοπογραφίας. Για την αφαίρεση της τοπογραφίας, αρχικά, το DEM της περιοχής προβάλλεται στις συντεταγμένες των απεικονίσεων και το υψόμετρο μετατρέπεται σε τοπογραφική φάση. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται παραγωγή τεχνητών κροσσών. Στην ουσία δημιουργείται ένα συμβολογράφημα που περιέχει αποκλειστικά την τοπογραφική φάση. Στην συνέχεια οι τεχνητοί κροσσοί που αντιστοιχούν στην τοπογραφία αφαιρούνται εύκολα από το εξομαλυμένο συμβολογράφημα. Η υπηρεσία GAMMA DInSAR χρησιμοποιεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM 4th έκδοσης και ανάλυσης 90 μέτρων, το οποίο ανακτά αυτόματα.

Προκύπτει κατά αυτόν τον τρόπο το διαφορικό συμβολογράφημα με την τιμή της διαφορικής φάσης να εκφράζει τις μεταβολές της απόστασης δορυφόρου-στόχου μεταξύ των λήψεων, συμπεριλαμβανομένων των όποιων επιδράσεων από παράγοντες αποσυσχέτισης, αυτών της ατμόσφαιρας και της αβεβαιότητας των τροχιακών δεδομένων.

Φιλτράρισμα Διαφορικού Συμβολογραφήματος (Goldstein filtering)

Για την μετέπειτα διαδικασία εκτύλιξης της φάσης, είναι απαραίτητη η εφαρμογή φίλτρων για την μείωση του θορύβου λόγω των φαινομένων αποσυσχέτισης αλλά και της παρουσίας στιγμάτων στα διαφορικά συμβολογραφήματα.

Η εφαρμογή των φίλτρων γίνεται στο πεδίο των συχνοτήτων και αφορά φίλτρα μέσου όρου που επιδρούν στις μιγαδικές τιμές της απεικόνισης (φανταστικό & πραγματικό μέρος) και όχι μόνο στο μέτρο. Ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι η εφαρμογή φίλτρου κατά συχνότητα σε χωρική βάση, που πρότειναν οι Goldstein & Werner (φίλτρο Goldstein).

Πρόκειται για την λεγόμενη προσαρμοσμένη επεξεργασία (adaptive processing), όπου εφαρμόζει στο συμβολογράφημα ένα φίλτρο κατάλληλων διαστάσεων. Με το φιλτράρισμα, το συμβολογράφημα μεταφέρεται στο πεδίο των συχνοτήτων και στη συνέχεια με αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier επανέρχεται στο πεδίο του χώρου. Το πλεονέκτημα του προσαρμοσμένου φίλτρου έγκειται στην δυνατότητα μεγιστοποίησης της ισχύος του σήματος προς αυτή του θορύβου που το συνοδεύει, ανεξάρτητα της μορφής του σήματος.

Η εφαρμογή του φίλτρου Goldstein αυξάνει την ευκρίνεια των κροσσών, ενώ μειώνει το θόρυβο που εισέρχεται στην εικόνα από την χωρική και χρονική αποσυσχέτιση. Έχει την ιδιότητα να εξομαλύνει την φάση σε περιοχές με υψηλή συσχέτιση, μην επηρεάζοντας τις περιοχές με χαμηλή συσχέτιση.

Εκτύλιξη Συμβολομετρικής Φάσης (Phase unwrapping)

Σκοπός της εκτύλιξης της φάσης είναι η ανάκτηση της πληροφορίας των ακέραιων κύκλων, έτσι ώστε η τιμή της φάσης να λαμβάνει τις πραγματικές τις τιμές πέρα από το όριο $[0, 2\pi)$. Δεδομένου ότι η φάση του σήματος Ραντάρ δεν είναι συνεχής, για να επιτευχθεί μια αλληλουχία της τιμής της στο σύνολο του συμβολογραφήματος πρέπει να προστεθεί σε κάθε εικονοστοιχείο ένα ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π , ώστε να εκτιμηθεί από το παρατηρούμενο μέρος της φάσης η πραγματική τιμή της.

Η εκτύλιξη της φάσης ενός συμβολογραφήματος (phase unwrapping) αποτελεί το πιο δύσκολο και χρονοβόρο στάδιο της συμβολομετρικής διαδικασίας, το οποίο μάλιστα πολλές φορές δεν ολοκληρώνεται επιτυχώς. Ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο (ορεινές εκτάσεις), οι γεωμετρικές παραμορφώσεις των απεικονίσεων καθιστούν τη διαδικασία εκτύλιξης αρκετά δυσχερή.

Για την εκτύλιξη της συμβολομετρικής φάσης η υπηρεσία GAMMA DInSAR της πλατφόρμας G-POD χρησιμοποιεί την Μέθοδο Τοπικής Ανάπτυξης (Region Growing Method). Η συγκεκριμένη μέθοδος υπάγεται στην κατηγορία μεθόδων ολοκλήρωσης. Εφαρμόζει την εκτύλιξη της φάσης από τις εύκολες περιοχές και προχωρά σταδιακά προς τις δυσκολότερες. Με τον τρόπο αυτό απομονώνονται περιοχές όπου η διαδικασία της εκτύλιξης είναι δύσκολη και αβέβαιη, αποτρέποντας την διάδοση των σφαλμάτων σε όλη την εικόνα.

Ως βάση για την εκτύλιξη της φάσης χρησιμοποιείται η εικόνα συνάφειας. Αρχικά τοποθετούνται οι γόνιμοι (seeds) σε εικονοστοιχεία με υψηλή συνάφεια, ώστε να αρχίσει η εκτύλιξη (unwrapping). Πριν δοθεί η τιμή της αποκατεστημένης φάσης, πραγματοποιείται έλεγχος ποιότητας σε κάθε εικονοστοιχείο. Η εκτύλιξη προχωρά σταδιακά στα γειτονικά εικονοστοιχεία (ανάπτυξη – growing), όπου και αποδίδεται η εκτυλιγμένη τιμή φάσης, χρησιμοποιώντας όσο το δυνατόν περισσότερα, ήδη αποκατεστημένα, εικονοστοιχεία. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται αποκατεστημένες περιοχές (regions). Όταν δύο περιοχές συναντιούνται, ενώνονται μετά από έλεγχο ποιότητας που πραγματοποιείται στο κοινό τους όριο.

Ο έλεγχος ποιότητας στηρίζεται στην τιμή της συνάφειας, όπου ξεκινάει από την τιμή 1 (απόλυτη συνάφεια) και σταδιακά ελαττώνεται μέχρι να γίνει η εκτύλιξη και στις δύσκολες περιοχές με χαμηλή συνάφεια. Απαραίτητο είναι να προσδιοριστεί το κατώτατο όριο συνάφειας και ονομάζεται κατώφλι ελέγχου συνάφειας (coherence threshold). Τα εικονοστοιχεία με συνάφεια μικρότερη του κατωφλίου δεν πραγματοποιείται εκτύλιξη. Στην παρούσα εργασία η τιμή του κατωφλίου ορίστηκε 0,4, σύμφωνα και με τις οδηγίες της ομάδας G-POD.

Μετατροπή Φάσης

Η εκτυλιγμένη διαφορική συμβολομετρική φάση αφορά τις παραμορφώσεις κατά μήκος της διεύθυνσης LOS σε ακτίνια (π). Η διαδικασία μετατροπής της φάσης σε μονάδες μήκους αποτελεί μια σχετικά περίπλοκη διαδικασία λόγω των γεωμετρικών παραμορφώσεων των SAR απεικονίσεων και των μεταβολών του ανύσματος βάσης κατά την διάρκεια των λήψεων. Με αυτή την έννοια, η εξέταση της τιμής του εγκάρσιου ανύσματος βάσης σε κάθε εικονοστοιχείο αποτελεί κρίσιμο σημείο της μετατροπής, όχι μόνο λόγω της εξάρτησης των παρατηρήσεων από το υψόμετρο, αλλά επίσης λόγω πιθανής μη παραλληλίας μεταξύ των τροχιών.

Η τεχνική που εφαρμόζεται, προϋποθέτει την βελτίωση της εκτίμησης των τροχιακών παραμέτρων και κατ' επέκταση την γεωμετρία της λήψης. Με κατάλληλο αριθμό σημείων αναφοράς (από το DEM) προσδιορίζεται η μεταβολή της θέσης και του προσανατολισμού του ανύσματος βάσης εντός του συμβολογραφήματος.

Γεωκωδικοποίηση (Geocoding)

Το τελικό στάδιο της επεξεργασίας περιλαμβάνει τη γεωμετρική διόρθωση των δεδομένων προσδιορίζοντας τις παραμέτρους μετασχηματισμού μεταξύ της γεωμετρίας ραντάρ και ενός επιλεγμένου γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η προβολή των αποτελεσμάτων σε οποιοδήποτε υπόβαθρο (π.χ. χάρτες, δορυφορικές εικόνες) για περαιτέρω ερμηνεία.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας, το λογισμικό GAMMA εφαρμόζει την τεχνική χωρίς τη βοήθεια DEM, όμως απαραίτητη προϋπόθεση είναι η βελτίωση της εκτίμησης του μήκους του ανύσματος βάσης. Με δεδομένες τις θέσεις των δορυφόρων και την θέση του εκάστοτε εικονοστοιχείου στο διαφορικό συμβολογράφημα (αζιμούθιο και κεκλιμένη απόσταση), υπολογίζεται με άμεση γεωκωδικοποίηση η πραγματική θέση στην επιφάνεια, με την πρόσθεση του ανύσματος παρατήρησης στο άνυσμα θέσης του δορυφόρου. Συνήθως για την επακόλουθη παρεμβολή των δεδομένων σε κανονικό κάρναβο χρησιμοποιείται τριγωνισμός ακολουθούμενος από γραμμική παρεμβολή.

Διόρθωση κάθετου ανύσματος Βάσης (Baseline refinement)

Η διάκριση του θορύβου της φάσης από τις μη γραμμικές παραμορφώσεις, βασίζεται στις φασματικές παραμέτρους αυτού. Συνήθως η φάση που αντιστοιχεί σε θόρυβο έχει χαμηλή συχνότητα στη χωρική διάσταση και υψηλή συχνότητα στη χρονική διάσταση. Ο θόρυβος που οφείλεται σε εσφαλμένη εκτίμηση του ανύσματος βάσης υπάγεται στην παρούσα φασματική κατηγορία και προκαλεί πλασματικούς κροσσούς συμβολής. Οι κροσσοί αυτοί εμφανίζονται σχεδόν παράλληλοι μεταξύ τους στην διεύθυνση του αζιμούθιου.

Η αφαίρεση του θορύβου αυτού επιτυγχάνεται με την βελτίωση και διόρθωση των ανυσμάτων βάσης (baseline refinement). Για την διόρθωση του ανύσματος βάσης λαμβάνονται υπόψη αφ' ενός τα τροχιακά δεδομένα, αλλά και το αρχικό συμβολογράφημα και το DEM της περιοχής. Στην ουσία γίνεται επαναπροσδιορίζεται το ύψος πτήσης των δορυφόρων βάσει της συμβολομετρικής φάσης και της τιμής του υψομέτρου από το DEM

5.3 Μεθοδολογία Σώρευσης Συμβολογραφημάτων (Stacking)

Οι επί μέρους φάσεις της διαδικασίας Σώρευσης περιλαμβάνουν αρχικά την επιλογή των κατάλληλων εκτυλιγμένων διαφορικών συμβολογραφημάτων. Στην συνέχεια, απαιτούνταν η επιλογή της καταλληλότερης θέσης για την αναφορά των δεδομένων και απομάκρυνση των φάσεων τους σε κάθε διαφορικό συμβολογράφημα από τις αντίστοιχες διαφορικές τους φάσεις με ταυτόχρονο μηδενισμό τους στο σημείο αναφοράς.

Ακολούθως, εφαρμόζεται η στατιστική εκτίμηση του μέσου ρυθμού μεταβολής των φάσεων μέσω της σταθμισμένης άθροισης των εκτυλιγμένων διαφορικών φάσεων, όπου τα βάρη να προέρχονται από τα χρονικά εύρη των διαφορικών συμβολογραφημάτων. Τέλος, η διαδικασία ολοκληρώνεται με την μετατροπή των σωρευμένων φάσεων σε μήκος και με τον μετασχηματισμό των δεδομένων στην επιλεγμένη χαρτογραφική προβολή.

Ωστόσο, η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής δεν κατέστη δυνατή για δύο κυρίως λόγους. Αρχικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την υπηρεσία GAMMA DInSAR περιείχαν πολλά σφάλματα, οπότε δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω επεξεργασία. Δεύτερον, για την σώρευση των διαφορικών συμβολογραφημάτων απαιτούνταν η δημιουργία μιας υπηρεσίας για αυτό τον σκοπό, καθώς δεν μπορούσε να εφαρμοστεί με διαφορετικό τρόπο. Η υπηρεσία αυτή δεν ολοκληρώθηκε από την ESA στο χρονικό πλαίσιο εκπόνησης της εργασίας, οπότε δεν κατέστη δυνατό η ολοκλήρωση της μεθόδου.

5.4 Μεθοδολογία Μικρού Ανύσματος Βάσης (SBAS)

Η υπηρεσία SBAS είναι αποτέλεσμα της συνεργασίας του CNR-IREA (Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell' Ambiente) και της ESA, όπου ανέπτυξαν τον αλγόριθμο "Parallel SBAS (P-SBAS)". Η υπηρεσία προσαρμόστηκε στην πλατφόρμα G-POD, καθώς μ' αυτόν τον τρόπο αξιοποιεί τους υψηλούς υπολογιστικούς πόρους της πλατφόρμας. Προσφέρει στους χρήστες την δυνατότητα να εφαρμόσουν την μεθοδολογία SBAS και να παράγουν χρονοσειρές παραμόρφωσης για οποιαδήποτε περιοχή μελέτης, χωρίς γνώσεις προγραμματισμού και εξειδικευμένων λογισμικών επεξεργασίας δεδομένων ραντάρ.

Επιπλέον, ένα ακόμη πλεονέκτημα της υπηρεσίας είναι δεν απαιτείται από τον χρήστη να ανακτήσει και να αποθηκεύσει στον Η/Υ εργασίας του τα μεγάλα σε όγκο δεδομένα. Χάρη στην μεγάλη υπολογιστική δυνατότητα του συστήματος τα αποτελέσματα παράγονται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ σε διαφορετική περίπτωση θα απαιτούνταν πολλές ώρες με ταυτόχρονη επίβλεψη από το χρήστη.

Για την εφαρμογή της μεθόδου Small Baseline Subset χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες εικόνες που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά διαφορετικού βαθμού επεξεργασίας. Η εφαρμογή SBAS δεν χρησιμοποιεί εικόνες SLC, όπου είναι δεδομένα πρώτου βαθμού επεξεργασίας (Level 1), αλλά πρωτογενή δεδομένα μηδενικής επεξεργασίας (raw data - Level 0). Οι ημερομηνίες των απεικονίσεων παραμένουν όμως οι ίδιες.

Τα δεδομένα που εισάγονται είναι μορφής (format) CEOS, το οποίο έχει καθιερωθεί από την Επιτροπή Δορυφορικών Παρατηρήσεων της Γης (Committee on Earth Observation Satellites, CEOS). Η μορφή αυτή που περιλαμβάνει πληροφορίες για το μέγεθος του αρχείου, το υψόμετρο και την ταχύτητα του δορυφόρου, τις συντεταγμένες της περιοχής που απεικονίζεται, και την ημερομηνία και ώρα της λήψης της εικόνας.

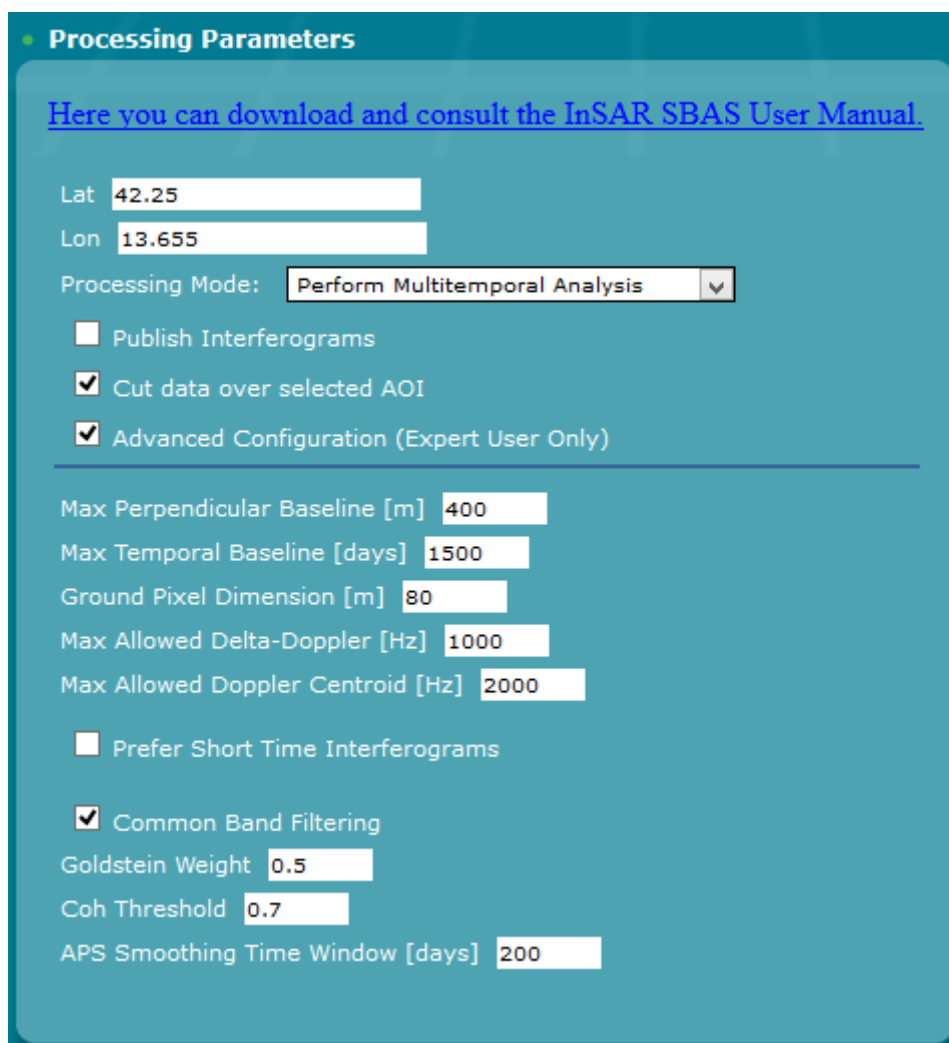
Οι ενέργειες που απαιτούνται από την χρήστη μόλις εισέλθει στην υπηρεσία είναι οι ακόλουθες:

Αρχικά, επιλέγεται η περιοχή ενδιαφέροντος (Area of Interest – AOI), ορίζοντας ένα παραλληλόγραμμο σχήμα. Οι διαστάσεις προτείνεται να είναι όσο το δυνατό μικρότερες για την καλύτερη ποιότητα των αποτελεσμάτων. Στις μεγάλες περιοχές απαιτείται περισσότερος χρόνος υπολογισμού, αλλά κυρίως εμπεριέχονται σφάλματα εξαιτίας των διαφορικών ατμοσφαιρικών συνθηκών εντός της περιοχής.

Στην συνέχεια, ορίζεται το χρονικό διάστημα αναζήτησης των διαθέσιμων εικόνων, καθώς επίσης και ο τύπος των εικόνων. Η συγκεκριμένη υπηρεσία χρησιμοποιεί δεδομένα μηδενικής επεξεργασίας (Level 0) των δορυφόρων ERS 1 & 2 και ENVISAT. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής του αριθμού συγκεκριμένης τροχιάς εφόσον είναι γνωστή από τον χρήστη, καθώς βελτιώνει τα αποτελέσματα της αναζήτησης δεδομένων.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα διαθέσιμα δεδομένα, όπου επιλέγονται από τον χρήστη τα κατάλληλα σύμφωνα με τις προτιμήσεις του και κατά πόσο καλύπτουν την περιοχή μελέτης. Να σημειωθεί ότι ο ελάχιστος αριθμός εικόνων είναι περίπου 20. Μετά την επιλογή των δεδομένων επιλέγεται και το σημείο αναφοράς, είτε με την εισαγωγή συντεταγμένων, είτε με τον ορισμό του μέσω οπτικής επόπτευσης της περιοχής. Όπως είναι φυσικό το σημείο αναφοράς πρέπει να βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης.

Εκτός των παραπάνω απαραίτητων ενεργειών από τον χρήστη, δίνεται η δυνατότητα να διαφοροποιηθούν ορισμένες καίριες παράμετροι της διαδικασίας, εφόσον ο χρήστης βρίσκεται σε προχωρημένο επίπεδο (advanced user). Αυτές οι παράμετροι αφορούν το χρονικό και χωρικό άνυσμα βάσης (temporal and perpendicular baseline), αλλά και το μέγεθος του εικονοστοιχείου των αποτελεσμάτων. Επίσης, μπορεί να διαφοροποιηθεί η τιμή καταφλίου της απαιτούμενης συνάφειας (εξ ορισμού είναι ίση με 0.7), εις βάρος όμως της συνολικής ποιότητας των αποτελεσμάτων.



Processing Parameters

[Here you can download and consult the InSAR SBAS User Manual.](#)

Lat

Lon

Processing Mode:

Publish Interferograms

Cut data over selected AOI

Advanced Configuration (Expert User Only)

Max Perpendicular Baseline [m]

Max Temporal Baseline [days]

Ground Pixel Dimension [m]

Max Allowed Delta-Doppler [Hz]

Max Allowed Doppler Centroid [Hz]

Prefer Short Time Interferograms

Common Band Filtering

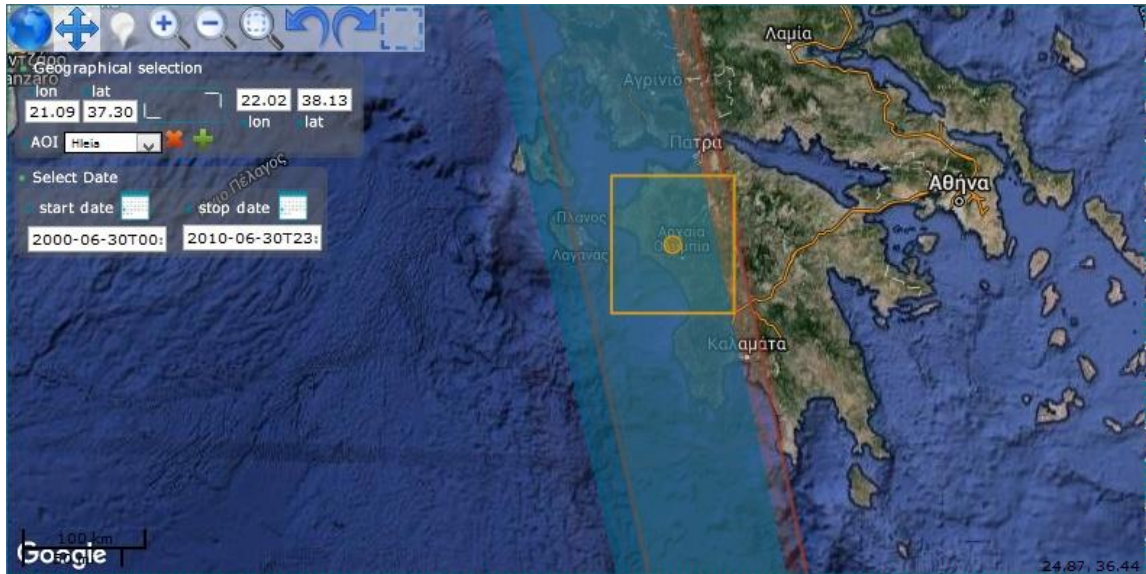
Goldstein Weight

Coh Threshold

APS Smoothing Time Window [days]

Εικόνα 5.3: Παράμετροι της υπηρεσίας SBAS

Παρατηρείται μια διαφοροποίηση στην επικάλυψη των εικόνων. Παρόλο που οι εικόνες ανήκουν στην ίδια τροχιά (π.χ. ανοδική 186) παρατηρούνται ορισμένες μετατοπίσεις στις διαφορετικές ημερομηνίες λήψεων. Αυτό συνεπάγεται ότι οι διαφορετικές εικόνες δεν καλύπτουν επακριβώς την ίδια περιοχή, για αυτό το λόγο κατά την επεξεργασία επιλέγεται το κοινό τμήμα όλων των εικόνων που χρησιμοποιούνται τελικώς από τον αλγόριθμο. Οπότε, αφ ενός η τελική περιοχή ενδέχεται να είναι μικρότερη συγκριτικά με τις εικόνες SLC, αφ ετέρου δημιουργεί προβλήματα στην συμπροσαρμογή των εικόνων.



Εικόνα 5.4: Τροχιές επιλεγμένων raw δεδομένων στην περιοχή μελέτης.

Κύρια παράμετρος της τεχνικής SBAS είναι η επιλογή της σημείου αναφοράς (reference point) βάσει του οποίου εκτιμάται η διαχρονική επιφανειακή παραμόρφωση. Η γνώση εκ των προτέρων του γενικότερου καθεστώτος κατακρύφωφον κινήσεων της περιοχής επιτρέπει την ορθή επιλογή της αναφοράς, σύμφωνα πάντα με τους επιδιωκόμενους στόχους της μελέτης.

Βιβλιογραφικά συνίσταται το σημείο αναφοράς να λαμβάνεται σε αστικές περιοχές, καθώς σε αυτές τις περιοχές διατηρείται διαχρονικά η υψηλή συνάφεια και όσο το δυνατό σε μικρότερο υψόμετρο. Βασική προϋπόθεση για την επιλογή του σημείου είναι να μην ορίζεται σε περιοχές με ιστορικό παραμόρφωσης, ενώ προτείνεται να ορίζεται σε βραχώδες υπόβαθρο και να αποφεύγονται χαλαροί και πρόσφατοι γεωλογικοί σχηματισμοί.

Η επιλογή του σημείου αναφοράς στο Νομό Ηλείας ήταν ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία, καθώς ήταν δύσκολο να πληρούνται όλες οι παραπάνω προϋποθέσεις. Αρχικά υπήρχαν περιορισμοί ως προς την υψηλή συνάφεια που απαιτείται. Περιοχές με φυτοκάλυψη αποκλείονται, καθώς παρουσιάζουν μεγάλη αποσυσχέτιση, οπότε οι περισσότερες εκτάσεις του νομού δεν ήταν κατάλληλες. Επίσης, κρίθηκε σκόπιμο να μην οριστεί σε αστικές περιοχές (Πύργος, Αμαλιάδα, Ζαχάρω), καθώς αυτές οι περιοχές δομούνται πάνω σε τεταρτογενείς σχηματισμούς, οπότε υπάρχει η πιθανότητα καθίζησης αυτών από το βάρος των υποδομών. Αυτό θα συνεπαγόταν εσφαλμένο υπολογισμό της παραμόρφωσης. Επίσης, η τεκτονική της περιοχής πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη, δεδομένου του μεγάλου ποσοστού παραμόρφωσης από τις τεκτονικές κινήσεις.

Από τα παραπάνω θεωρήθηκε ότι η καταλληλότερη περιοχή αποτελεί το ασβεστολιθικό υπόβαθρο που εμφανίζεται στον Νομό Ηλείας. Το υπόβαθρο χαρακτηρίζεται από διαχρονικά υψηλή συνάφεια, ενώ παράλληλα θεωρείται σταθερό ως προς τους υπόλοιπους σχηματισμούς. Επί πλέον, εξαιτίας του γεγονότος ότι αποτελεί το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής δεν επηρεάζεται από τις σύγχρονες τεκτονικές κινήσεις. Διευκολύνει επίσης την ερμηνεία της μη τεκτονικής φύσης κατακόρυφων κινήσεων εντός των μεταλλικών λεκανών από ανεξάρτητη γεωτεκτονικά θέση, αποτρέποντας συγχρόνως το ενδεχόμενο υποεκτίμησής τους.

Ως καταλληλότερη κρίθηκε η περιοχή στα ανατολικά του νομού όπου εμφανίζονται οι ασβεστόλιθοι της γεωτεκτονικής ενότητας Ωλονού - Πίνδου, που αποτελεί το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής, με σχετικά υψηλό υψόμετρο (~900 m).



Εικόνα 5.5: Στάδια της τεχνικής SBAS της αντίστοιχης υπηρεσίας της ESA.

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, τα στάδια της μεθοδολογίας για την δημιουργία των διαφορικών συμβολογραφημάτων είναι τα ίδια και στις δύο μεθόδους (Stacking και SBAS). Γι αυτό τον λόγο και δεν επαναλαμβάνονται σ' αυτό το σημείο. Όμως μετά τα συμβολογραφήματα διαφοροποιείται η τεχνική SBAS όπου ακολουθούνται διαφορετικά στάδια. Τα βήματα που αναλύονται παρακάτω αφορούν στον την τεχνική SBAS και τον υπολογισμού της μέσης ταχύτητας και των χρονοσειρών παραμόρφωσης.

Αρχικά πραγματοποιείται η εκτύλιξη της χρονικής φάσης και στην συνέχεια της χωρικής (TPHU, SPUH) σύμφωνα με τον αλγόριθμο EMCF που έχει αναπτύξει η ESA. Στην συνέχεια, για τις περιοχές με χαμηλή συνάφεια που εντάσσονται στο δίκτυο των εικονοστοιχείων που ορίζει ο αλγόριθμος EMCF πραγματοποιείται μεμονωμένα η εκτύλιξη φάσης με ένα συμβατικό αλγόριθμο EMCF.

Ακολούθως, πραγματοποιείται η αναστροφή των συμβολογραφημάτων (interferogram inversion) με την τεχνική της Αποσύνθεσης Μεμονωμένων Τιμών (Singular Value Decomposition). Κρίσιμο στάδιο είναι ο υπολογισμός και η αφαίρεση των αλμάτων φάσης (phase ramp) που οφείλονται στα τροχιακά δεδομένα.

Στην συνέχεια, πραγματοποιείται εκ νέου η εκτύλιξη της φάσης βάσει του ίδιου αλγορίθμου. Αντίστοιχα πραγματοποιείται εκ νέου και η εκτύλιξη των μεμονωμένων περιοχών χαμηλής συνάφειας, καθώς επίσης και δεύτερη αναστροφή των συμβολογραφημάτων. Τελευταίο στάδιο είναι ο υπολογισμός της χρονικής συνάφειας και ο υπολογισμός και η αφαίρεση της ατμοσφαιρικής φάσης, όπου και αποτελεί το πλεονέκτημα της μεθόδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Αποτελέσματα GAMMA DInSAR

Τα αποτελέσματα της υπηρεσίας GAMMA DInSAR περιλαμβάνουν το διαφορικό συμβολογράφημα που δημιουργήθηκε από κάθε ζεύγος εικόνων, τον χάρτη συνάφειας κάθε συμβολογραφήματος και τέλος τον χάρτη μετατοπίσεων όπως προκύπτει από την εκτύλιξη και μετατροπή της φάσης. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τρία διαφορετικά σετ αποτελεσμάτων που παρήχθησαν από την υπηρεσία. Ο λόγος που παρατίθενται μόνο τρία, είναι ότι αυτά είναι αντιπροσωπευτικά του συνόλου των αποτελεσμάτων. Δηλαδή, τα γραφήματα και οι αντίστοιχοι χάρτες συνάφειας και μετατοπίσεων που προέκυψαν μπορούν να διακριθούν σε τρεις ομάδες, βάσει των χαρακτηριστικών τους.

Αρχικά παρατίθενται οι χάρτες συνάφειας (coherence maps), όπου απεικονίζουν την συνάφεια του σήματος μεταξύ των εκάστοτε απεικονίσεων SAR που επιλέχθηκαν για την παραγωγή του διαφορικού συμβολογραφήματος. Το εύρος των τιμών συνάφειας κυμαίνεται από 0 έως 1, όπου μηδενικές τιμές λαμβάνουν οι περιοχές με πλήρη αποσυσχέτιση του σήματος, ενώ μεγαλύτερες τιμές υποδηλώνουν πολύ καλή συνάφεια του σήματος.

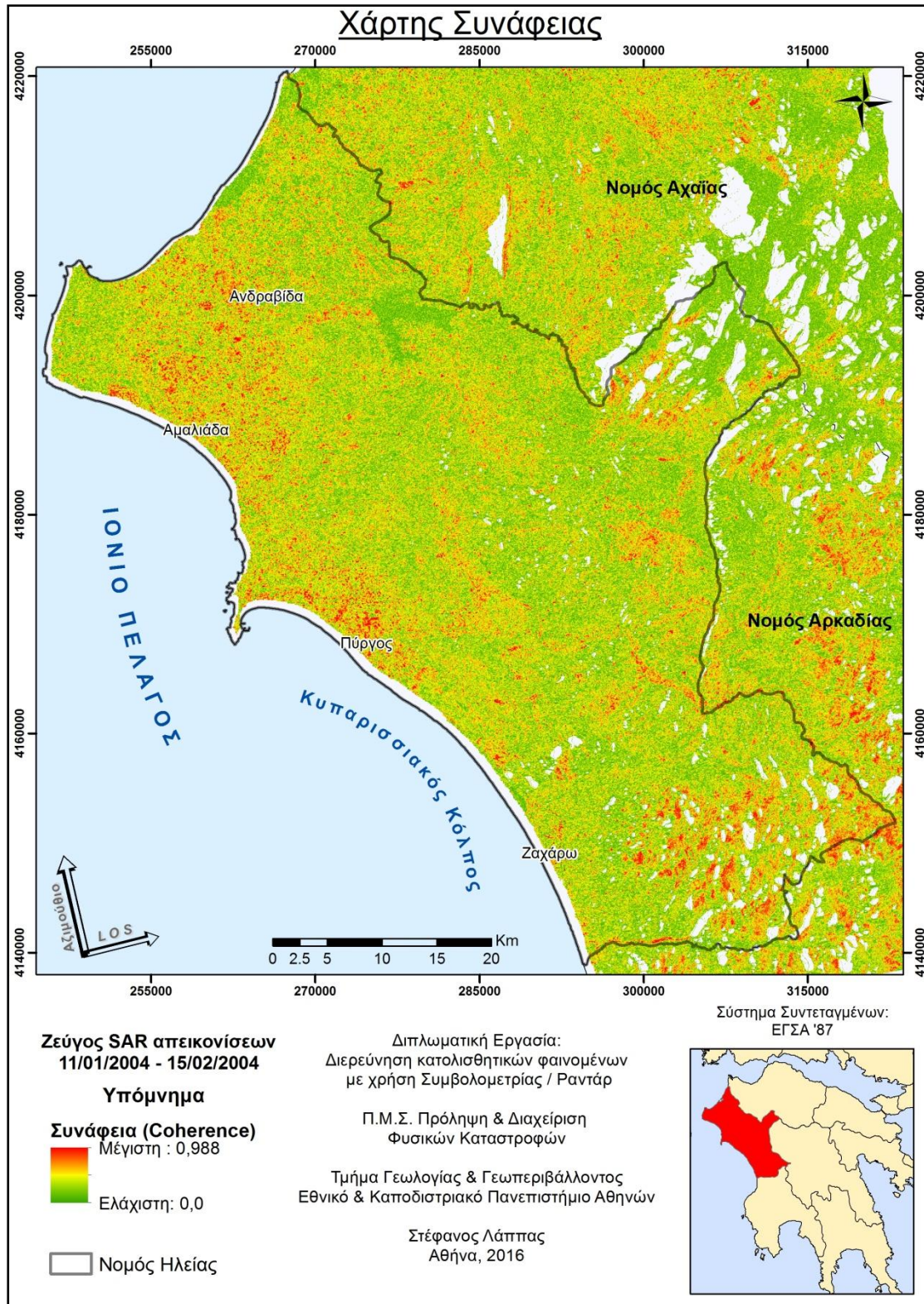
Για τον καθορισμό των κατάλληλων συμβολογραφημάτων που θα επιλεγούν να συμμετάσχουν στην διαδικασία της σωρευσης (stacking) απαιτείται η αξιολόγησή τους βάσει της ποιότητας του σήματος. Το μέτρο για την ποιότητα αυτών αναφέρεται στην συνάφεια (coherence) των παραγόμενων διαφορικών συμβολογραφημάτων, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πρέπει να τονιστεί ότι τους χάρτες αυτούς διακρίνονται κενές περιοχές, χωρίς καμία τιμή συνάφειας (null). Αυτές οι περιοχές αντιστοιχούν σε περιοχές που υπόκεινται σε γεωμετρικές παραμορφώσεις, όπως σμίκρυνση, επιμήκυνση και σκίαση και οι οποίες δεν είναι ορατές από τον δορυφόρο. Γι' αυτό τον λόγο επιλέχθηκαν να εξαιρεθούν πριν τον οποιοδήποτε υπολογισμό.

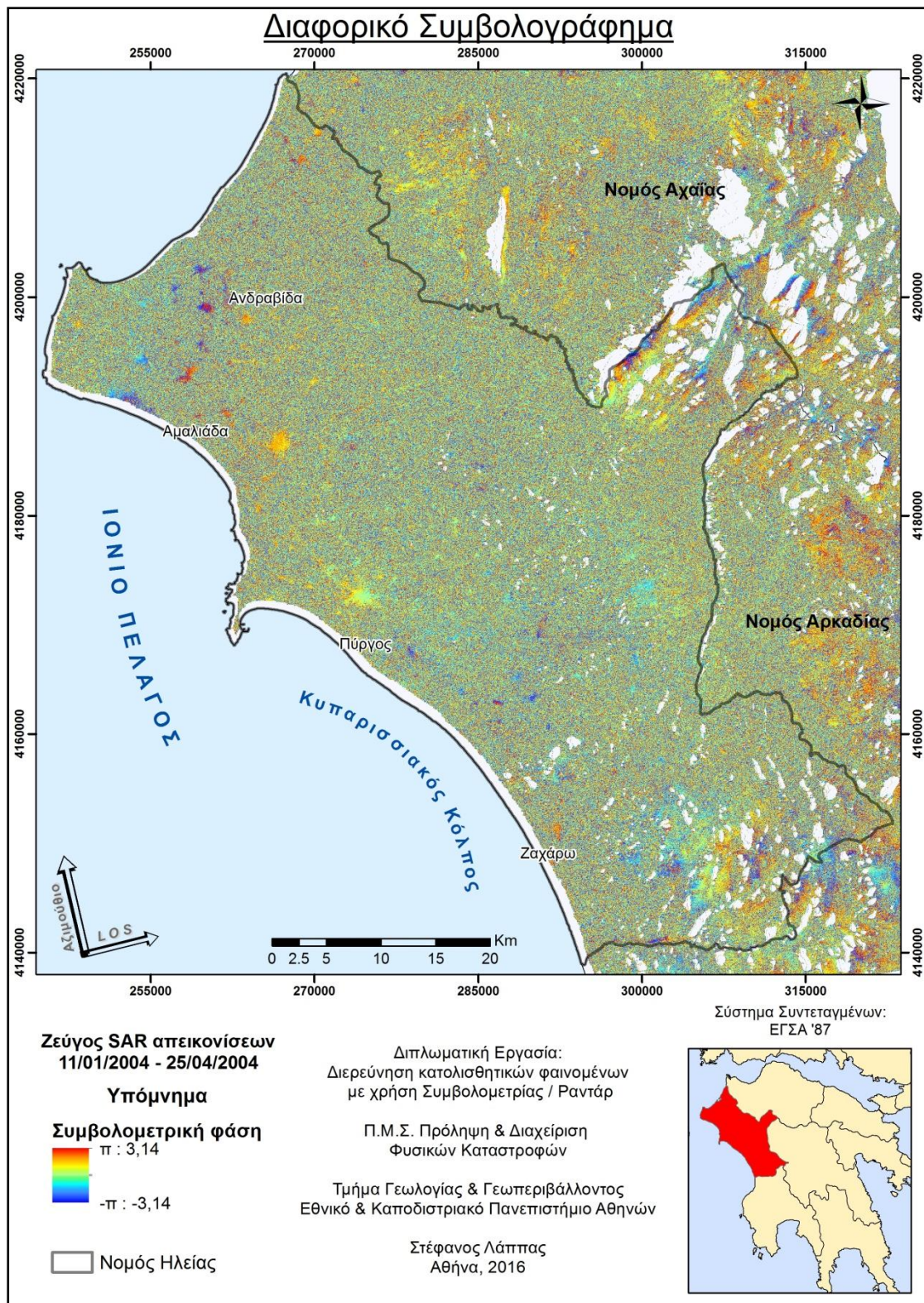
Σχεδόν στο σύνολο των μελετών που εφαρμόζεται η διαφορική συμβολομετρία, επιλέγεται μια τιμή κατωφλίου συνάφειας, κάτω του οποίου δεν πραγματοποιείται ο υπολογισμός του συμβολογραφήματος και κατ' επέκταση της μετατόπισης. Συνήθως επιλέγεται η τιμή 0.3 ή 0.4 το ανώτερο, καθώς σε περιοχές με μικρότερες τιμές η ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης θεωρείται χειρίστη και οποιαδήποτε αποτελέσματα προκύψουν θα περιέχουν μεγάλο ποσοστό σφάλματος.

Αντίστοιχα, ο κάθε χάρτης συνάφειας συνδυάζεται και με το αντίστοιχο συμβολογράφημα. Οι τιμές των διαφορικών συμβολογραφημάτων κυμαίνονται στο διάστημα $-\pi$ έως π (-3.14 έως 3.14). Ένας κροσσός συμβολής αντιστοιχεί σε ένα πλήρη κύκλο 2π και με την σειρά του αντιστοιχεί σε μετατόπιση $\lambda/2$, δηλαδή 28 χιλιοστά.

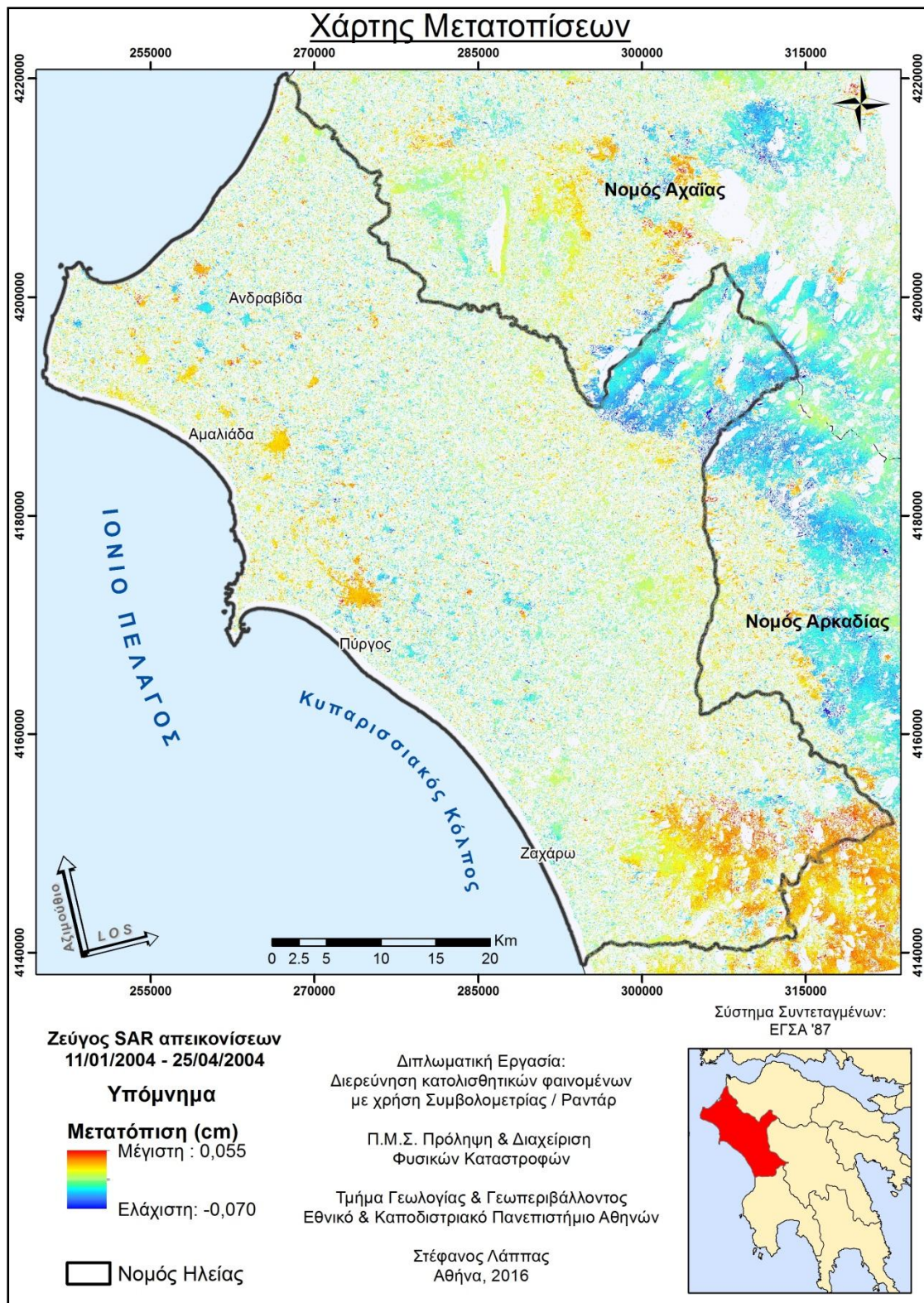
Στον Χάρτη 6.1 παρουσιάζεται ο χάρτης συνάφειας μεταξύ των απεικονίσεων που λήφθηκαν στις 11/01/2004 και 15/02/2004. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των δύο λήψεων είναι 35 ημέρες, όπου είναι το μικρότερο διάστημα λήψης του δορυφόρου ENVISAT.



Χάρτης 6.1: Χάρτης συνάφειας συμβολογραφήματος εικόνων 11/1/2004 & 15/2/2004



Χάρτης 6.2: Διαφορικό συμβολογράφημα των εικόνων 11/01/2004 & 25/04/2004.



Χάρτης 6.3: Χάρτης μετατοπίσεων του συμβολογραφήματος εικόνων 11/01/2004 & 25/04/2004.

Όπως παρατηρείται στον Χάρτη 6.1, εμφανίζονται αρκετές περιοχές με πολύ υψηλή συνάφεια, ενώ κυριαρχούν οι περιοχές με μέτρια συνάφεια. Με πιο προσεκτική εξέταση διαπιστώνεται ότι υψηλή συνάφεια παρουσιάζουν οι αστικές περιοχές, όπως η πόλη του Πύργου, της Αμαλιάδος και της Ζαχάρω. Αντίστοιχα και μικρότεροι οικισμοί παρουσιάζουν υψηλή συνάφεια γεγονός που εξηγείται στην υψηλή οπισθοσκέδαση των κτισμάτων και των ελεύθερων επιφανειών που επικρατούν σ' αυτές τις περιοχές.

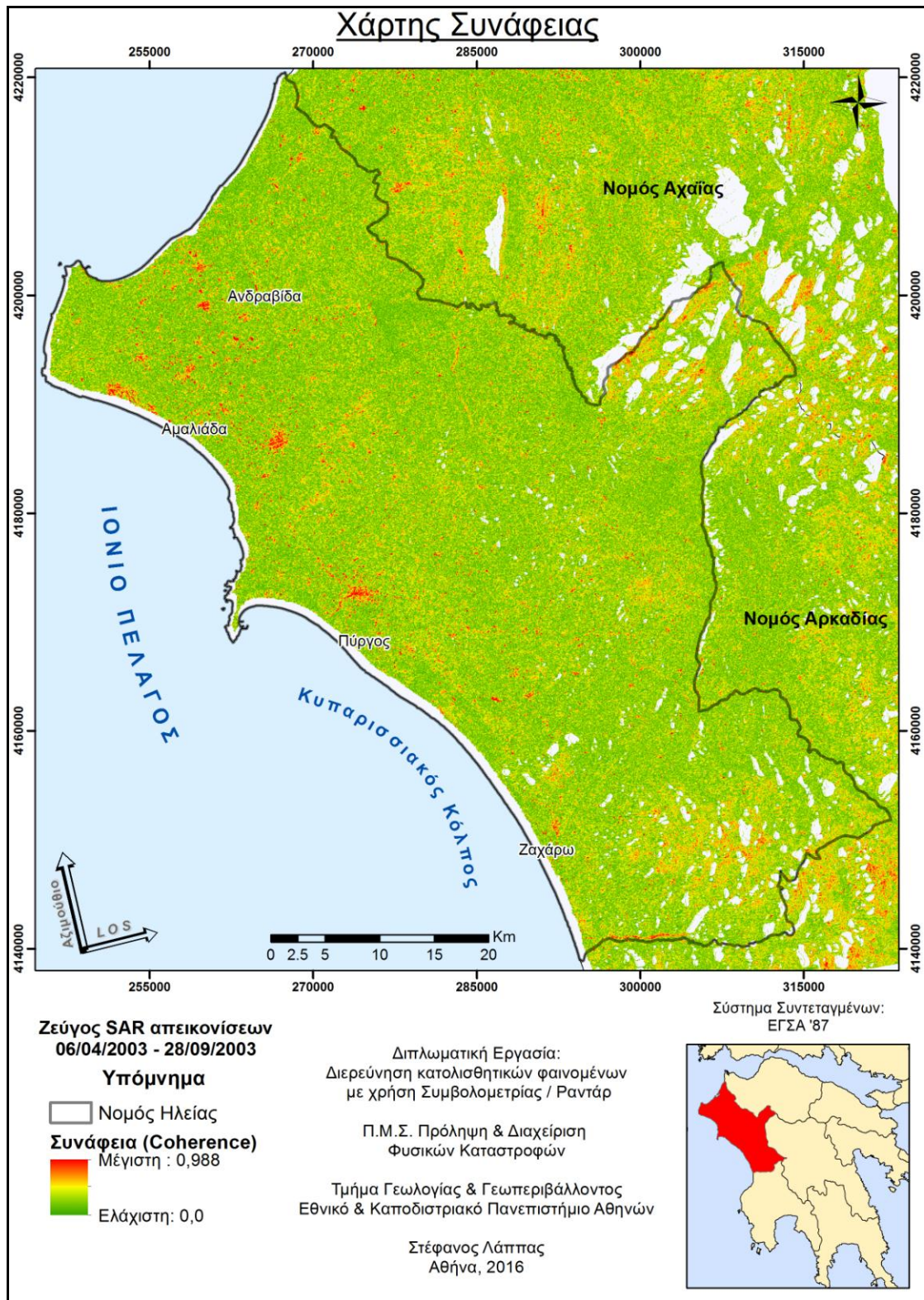
Επίσης, υψηλή συνάφεια παρατηρείται και σε περιοχές εκτός των οικισμών, οι οποίες κατά πάσα πιθανότητα αντιστοιχούν σε περιοχές με απουσία βλάστησης (γυμνά εδάφη) ή βραχώδεις εκτάσεις. Κυρίως αφορούν περιοχές με αραιή ή καθόλου φυτοκάλυψη, όπως χέρσες εκτάσεις και βραχώδη πρανή που παρουσιάζουν φαινόμενα ερημοποίησης. Επίσης, είναι χαρακτηριστικό ότι υψηλή συνάφεια παρουσιάζουν κυρίως οι πεδινές περιοχές στα δυτικά του νομού, ενώ προς τα ανατολικά όπου αρχίζει και αυξάνεται το υψόμετρο η συνάφεια μειώνεται. Ωστόσο, πολλές περιοχές χαρακτηρίζονται από χαμηλή συνάφεια.

Το ποσοστό της έκτασης του νομού που χαρακτηρίζεται με υψηλή συνάφεια ($\gamma > 0.7$) ανέρχεται στο 15,3%, ενώ με συνάφεια μεγαλύτερη του 0.3 είναι 44,1%. Αντίθετα, το 44,4% χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή συνάφεια.

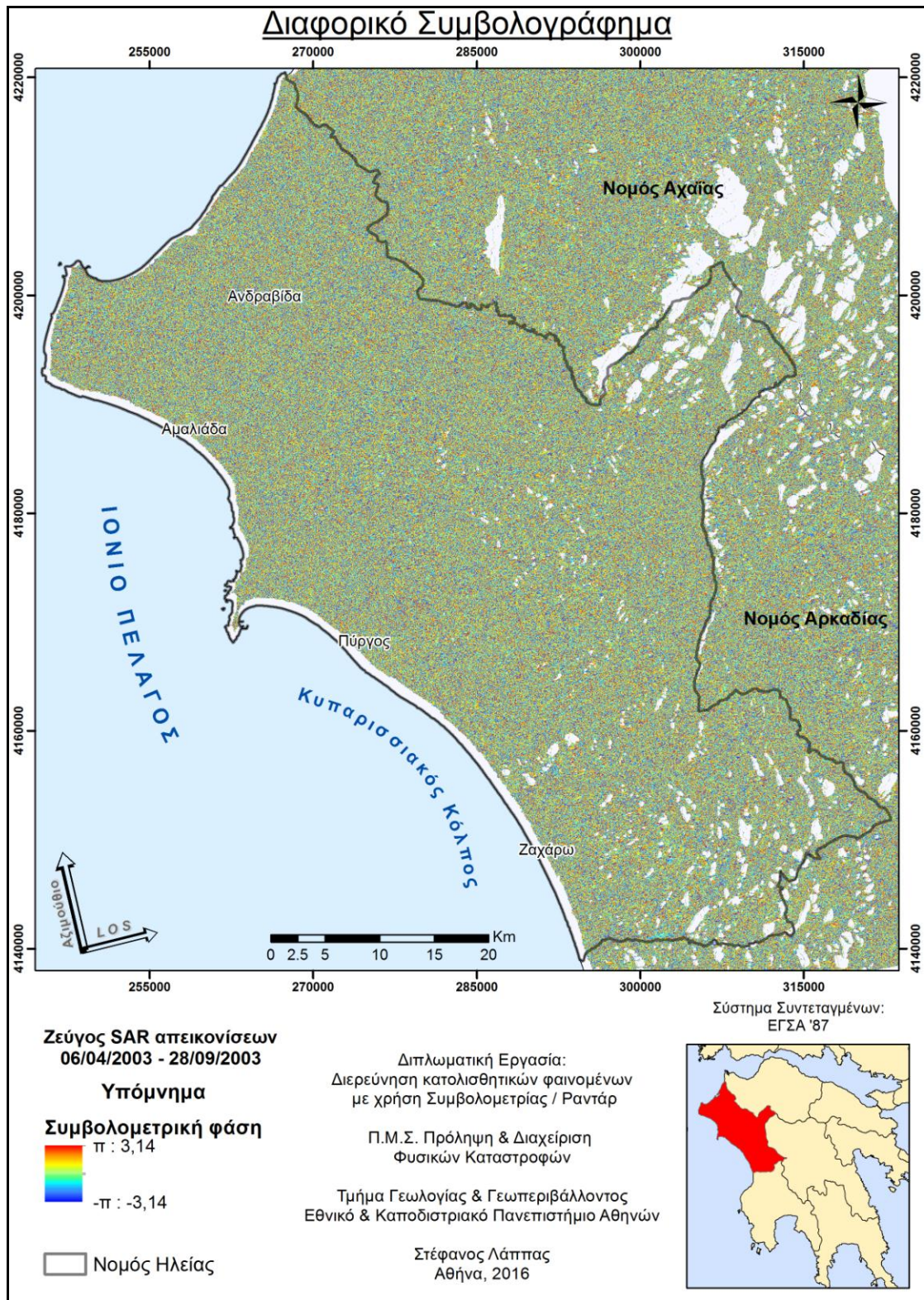
Στον Χάρτη 6.2 παρουσιάζεται το διαφορικό συμβολογράφημα από το ζεύγος εικόνων με ημερομηνία λήψης 11/01/2004 και 15/02/2004. Όπως φαίνεται στον χάρτη, δεν διακρίνεται κανένας ολοκληρωμένος κροσσός συμβολής. Μια υποψία κροσσών συμβολής μπορεί να παρατηρηθεί στα ΝΑ της περιοχής, χωρίς ωστόσο να ξεχωρίζει όπως αναμενόταν. Αντίθετα στην υπόλοιπη περιοχή οι τιμές παρουσιάζουν τυχαία κατανομή, μην οδηγώντας στην εξαγωγή κάποιου χρήσιμου συμπεράσματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το παρών συμβολογράφημα προέκυψε με το μικρότερο δυνατό διάστημα λήψης των απεικονίσεων και κατ' επέκταση με τη μεγαλύτερη δυνατή συνάφεια. Η απουσία κροσσών συμβολής μπορεί να εξηγηθεί από πολύ μικρή παραμόρφωση, καθώς η χρονική διαφορά μεταξύ των εικόνων είναι πολύ μικρή και δεν μπόρεσε να εντοπιστεί από τον δορυφόρο. Δηλαδή, υπάρχει η πιθανότητα η παραμόρφωση να ήταν μικρότερη της διακριτικής ικανότητας του δορυφόρου ($\lambda/2 = 28\text{mm}$), με αποτέλεσμα να μην εντοπίζεται από το συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων. Ωστόσο, η τυχαία κατανομή των τιμών και η απουσία κροσσών οφείλεται και στην χαμηλή συνάφεια του σήματος.

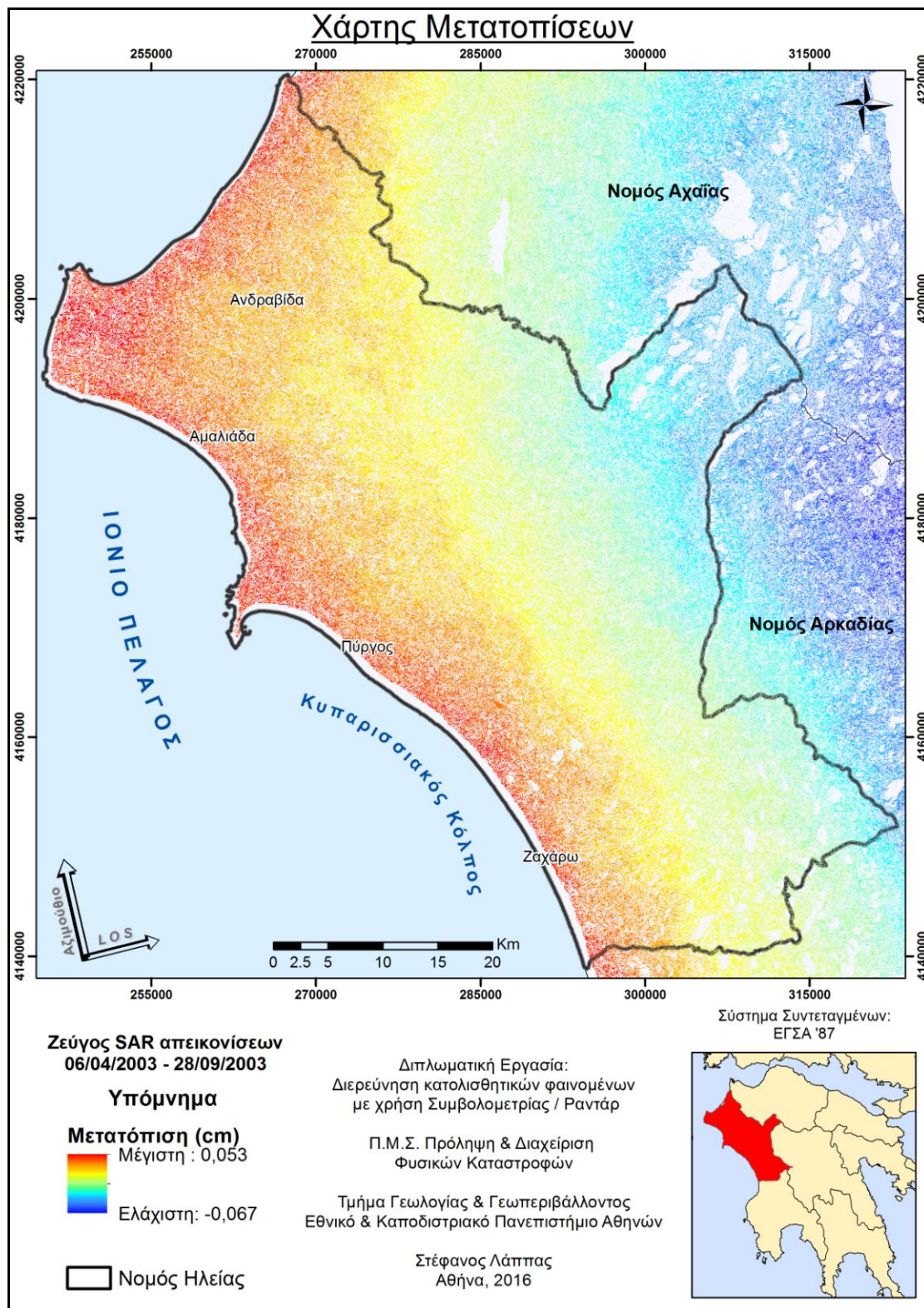
Τέλος όσον αφορά τον χάρτη μετατοπίσεων που προέκυψε από το προηγούμενο συμβολογράφημα, απεικονίζεται στον Χάρτη 6.3. Το εύρος της μετατόπισης είναι πολύ μικρό και κυμαίνεται από -0.070 έως 0.055 cm, δηλαδή μικρότερη του χιλιοστού. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι στα ΝΑ παρατηρείται μια περιοχή που ανυψώνεται, όπως και οι πόλεις του Πύργου, της Αμαλιάδας και της Ανδραβίδας. Επίσης, το ανατολικό τμήμα της περιοχής φαίνεται να καθιζάνει, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές οι τιμές είναι τυχαία κατανομημένες.



Χάρτης 6.4: Χάρτης συνάφειας συμβολογραφήματος εικόνων 6/4/2003 & 28/9/2003.



Χάρτης 6.5: Διαφορικό συμβολογράφημα των εικόνων 6/4/2003 & 28/9/2003



Χάρτης 6.6: Χάρτης μετατοπίσεων του συμβολογραφήματος εικόνων 6/4/2003 & 28/9/2003

Στον Χάρτη 6.4 παρουσιάζεται ο χάρτης συνάφειας μεταξύ των απεικονίσεων που λήφθηκαν στις 06/04/2003 και 28/09/2003. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των δύο λήψεων είναι 6 μήνες. Όπως παρατηρείται, οι περιοχές με υψηλή συνάφεια είναι αισθητά μικρότερες και υπερτερούν οι περιοχές με μικρές τιμές συνάφειας. Ωστόσο, είναι εμφανές ότι οι αστικές περιοχές χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές συνάφειας, ενώ οι περιαστικές περιοχές εμφανίζουν τάσεις αποσυσχέτισης του σήματος. Στις πεδινές περιοχές διατηρούνται σχετικά οι μέσες τιμές συνάφειας, ενώ αντίθετα στις ορεινές περιοχές παρατηρείται πλήρης αποσυσχέτιση του σήματος.

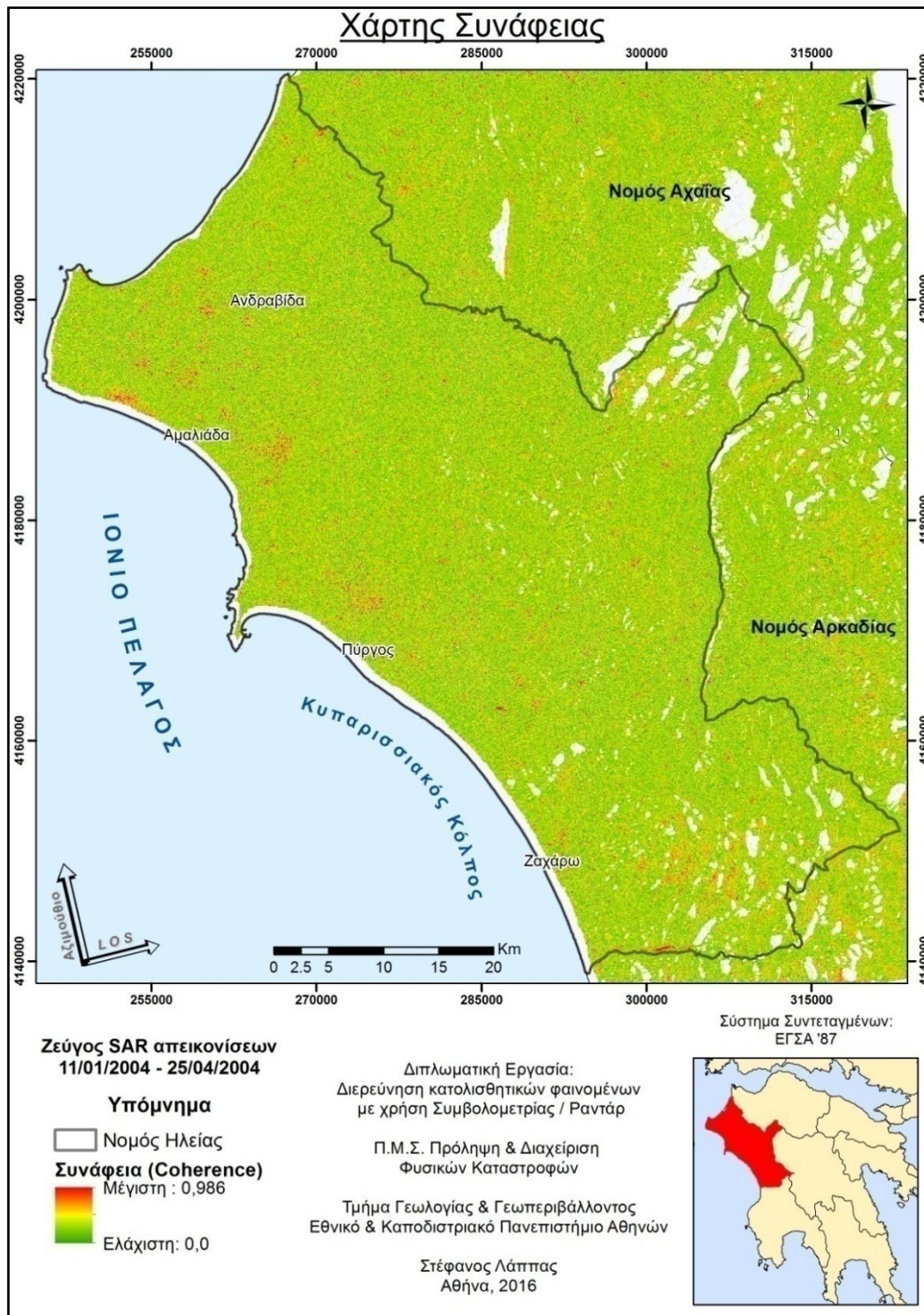
Το ποσοστό της έκτασης του νομού που χαρακτηρίζεται με υψηλή συνάφεια ($\gamma > 0.7$) ανέρχεται μόλις στο 10,2%, ενώ με συνάφεια $0.7 > \gamma > 0.3$ είναι 43,4%. Αντίθετα, το 46,4% χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλή συνάφεια. Δηλαδή, σχεδόν η μισή έκταση της περιοχής χαρακτηρίζεται από χαμηλή συνάφεια, όπου δεν μπορεί να υπολογιστεί ασφαλώς η μετατόπιση.

Όσον αφορά τον Χάρτη 6.5, απεικονίζει το διαφορικό συμβολογραφία του ζεύγους εικόνων με ημερομηνία λήψης 06/04/2003 και 11/05/2003, αντίστοιχα. Η χρονική διαφορά μεταξύ των λήψεων επιτρέπει τον εντοπισμό παραμορφώσεων, έστω και πολύ μικρών. Σε αυτή την περίπτωση είναι ξεκάθαρο ότι απουσιάζουν πλήρως οι κροσσοί συμβολής, ενώ παράλληλα δεν διακρίνεται και κανένα μοτίβο όσον αφορά τις τιμές φάσης. Το αποτέλεσμα χαρακτηρίζεται από μια τυχαία κατανομή των τιμών, μην οδηγώντας στην εξαγωγή χρήσιμου συμπεράσματος σχετικά με την παραμόρφωση στην περιοχή.

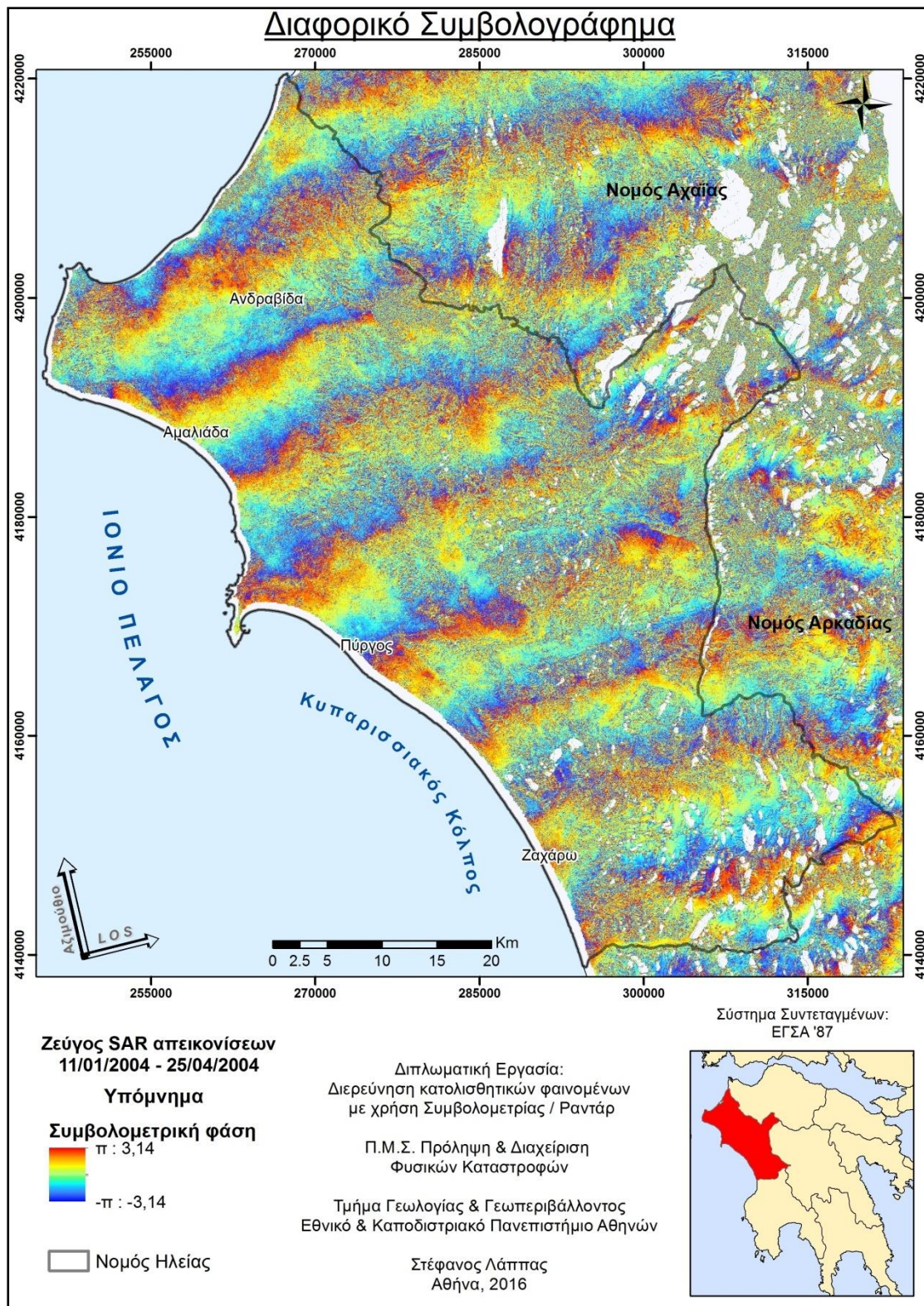
Το παραπάνω αποτέλεσμα οφείλεται καθαρά στην χαμηλή συνάφεια του σήματος. Η χαμηλή συνάφεια οφείλεται στην αποσυσχέτιση του σήματος μεταξύ των απεικονίσεων. Ωστόσο, η κακή ποιότητα του διαφορικού συμβολογραφήματος οφείλεται και στο μεγάλο ποσοστό θορύβου στο συμβολομετρικό σήμα. Ο θόρυβος που εμπεριέχεται στο σήμα δεν αφαιρέθηκε επιτυχώς κατά τα στάδια παραγωγής του συμβολογραφήματος. Κυρίως αφορά τον θόρυβο λόγω της χρονικής αποσυσχέτισης, καθώς η μεταβολή στην επιφάνεια ήταν τόσο μεγάλη που προκάλεσε πλήρη αποσυσχέτιση στο σήμα, μεταξύ των δύο απεικονίσεων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται η παραπάνω εικόνα.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα περισσότερα συμβολογραφήματα που παρήχθησαν. Αυτό σημαίνει ότι ήταν σφάλμα του λογισμικού, συγκεκριμένα της υπηρεσίας GAMMA DInSAR της ESA, καθώς είναι πρακτικά αδύνατο η πλειονότητα των διαφορικών συμβολογραφημάτων που παρήχθησαν να παρουσιάζουν το ίδιο αποτέλεσμα, ενώ προέρχονται από διαφορετικά ζεύγη εικόνων, με διαφορετικά ανύσματα βάσης και διαφορετικά διαστήματα λήψης. Κατόπιν επικοινωνίας με την ομάδα υποστήριξης της συγκεκριμένης υπηρεσίας αναφέρθηκε ότι απαιτούνται διορθώσεις στον κώδικα προγραμματισμού, διαδικασία όμως που είναι χρονοβόρα και ξεπερνούσε το χρονικό περιθώριο παράδοσης της παρούσας πτυχιακής.

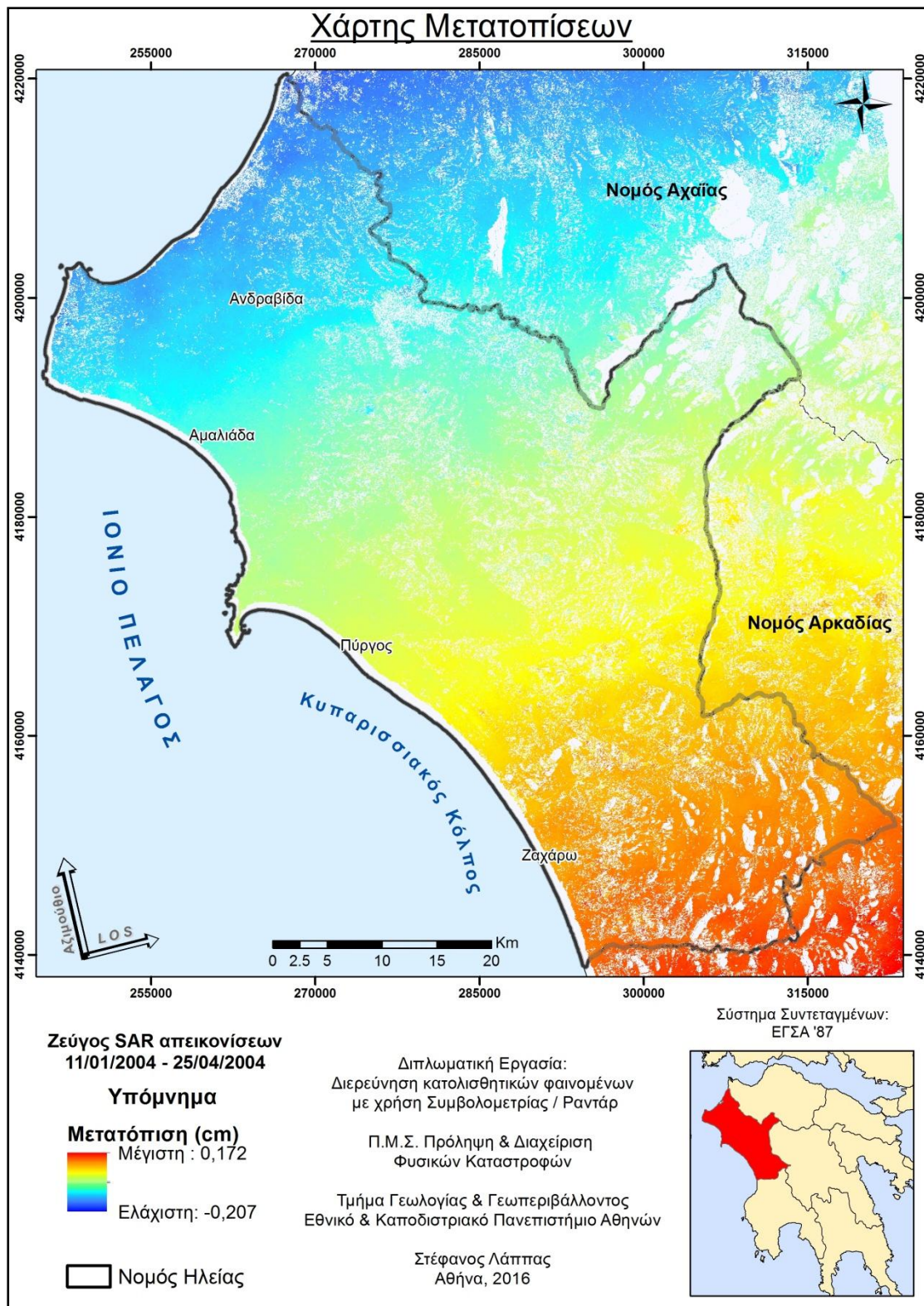
Σχετικά με τον χάρτη μετατοπίσεων, παρά το μικρό εύρος των τιμών (μικρότερο του χιλιοστού) φαίνεται ότι το δυτικό τμήμα ανυψώνεται και το δυτικό καθιζάνει. Το παραπάνω δεν έχει επιστημονική βάση και οφείλεται ξεκάθαρα στην εκτύλιξη της φάσης που αντιστοιχεί σε θόρυβο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των αποτελεσμάτων παραμόρφωσης παρουσιάζει αντίστοιχο αποτέλεσμα, το οποίο είναι λογικό καθώς προέρχεται από συμβολογραφήματα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και περιέχουν μεγάλο ποσοστό θορύβου.



Χάρτης 6.7: Χάρτης συνάφειας συμβολογραφήματος εικόνων 11/1/2004 & 25/4/2004



Χάρτης 6.8: Διαφορικό συμβολογράφημα των εικόνων 11/1/2004 & 25/4/2004



Χάρτης 6.9: Χάρτης μετατοπίσεων του συμβολογραφήματος εικόνων 11/1/2004 & 25/4/2004

Τέλος, στον Χάρτη 6.7 παρουσιάζεται ο χάρτης συνάφειας μεταξύ των απεικονίσεων που λήφθηκαν στις 11/01/2004 και 25/04/2004. Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των δύο λήψεων είναι ένας 3 μήνες. Χαρακτηριστικό του χάρτη αυτού είναι ότι οι περιοχές με υψηλές τιμές συνάφειας είναι ελάχιστες (σχεδόν απουσιάζουν), ενώ το σύνολο της περιοχής χαρακτηρίζεται από πλήρη αποσυσχέτιση του σήματος, με αποτέλεσμα να κυριαρχούν οι πολύ χαμηλές τιμές συνάφειας.

Τέλος, η τελευταία ομάδα συμβολογραφημάτων παρουσιάζει την εικόνα που φαίνεται στον Χάρτη 6.8, όπου απεικονίζεται το διαφορικό συμβολογράφημα του ζεύγους εικόνων με ημερομηνία λήψης 11/01/2004 και 25/04/2004, αντίστοιχα. Στον χάρτη αυτό διακρίνονται ξεκάθαρα κροσσοί συμβολής, οι οποίοι ωστόσο είναι παράλληλοι κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμούθιου. Το παραπάνω αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση σφάλματος, καθώς κροσσοί παράλληλοι στο αζιμούθιο οφείλονται αποκλειστικά στην ύπαρξη θορύβου λόγω σφάλματος υπολογισμού των τροχιακών δεδομένων.

Ο τρόπος αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος είναι πολύ απλός, καθώς υπάρχει πρόβλεψη στην υπηρεσία GAMMA DInSAR γι' αυτόν τον λόγο. Η λύση είναι σχετικά απλή και αφορά τον εκ νέου υπολογισμό του συγκεκριμένου συμβολογραφήματος, με την διαφορά όμως ότι επιλέγεται να πραγματοποιηθεί η βελτίωση του ανύσματος βάσης μέσω τροχιακών δεδομένων (baseline refinement). Το αποτέλεσμα ωστόσο μετά την εφαρμογή της βελτίωσης δεν διέφερε καθόλου από το αρχικό, υποδεικνύοντας ένα ακόμα σφάλμα της υπηρεσίας.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το συμβολογράφημα αποτελείται εξ ολοκλήρου από θόρυβο, αναμενόμενο είναι και ο χάρτης μετατοπίσεων να μην ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Σύμφωνα με τον Χάρτη 6.9, το ΒΔ τμήμα καθιζάνει, ενώ το ΝΑ ανυψώνεται, υποδεικνύοντας μια περιστροφική κίνηση. Φυσικά η κίνηση αυτή δεν είναι ρεαλιστική και δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η συνάφεια είναι αντιστρόφως ανάλογη του χρονικού διαστήματος λήψης μεταξύ των εικόνων. Απεικονίσεις με μικρό διάστημα λήψης μεταξύ τους χαρακτηρίζονται από υψηλή συνάφεια, ενώ όσο μεγαλώνει το διάστημα τόσο η συνάφεια μειώνεται. Το μικρότερο δυνατό διάστημα προκύπτει ότι είναι 35 ημέρες, ενώ το μέγιστο είναι περίπου ένας χρόνος. Η μέγιστη συνάφεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι παρόμοια μ' αυτή που απεικονίζεται στον Χάρτη 6.1. Γι' αυτόν τον λόγο προτιμώνται συμβολογραφήματα που παρήχθησαν από απεικονίσεις με όσο το δυνατό μικρότερο χρονικό διάστημα λήψης (small temporal baseline).

Μην έχοντας παραχθεί αξιόπιστα και κατάλληλα συμβολογραφήματα δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου της Σώρευσης Διαφορικών Συμβολογραφημάτων, καθώς τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν θα ήταν πλήρη από σφάλματα.

6.2 Αποτελέσματα SBAS

Αποτελέσματα ανοδικής τροχιάς

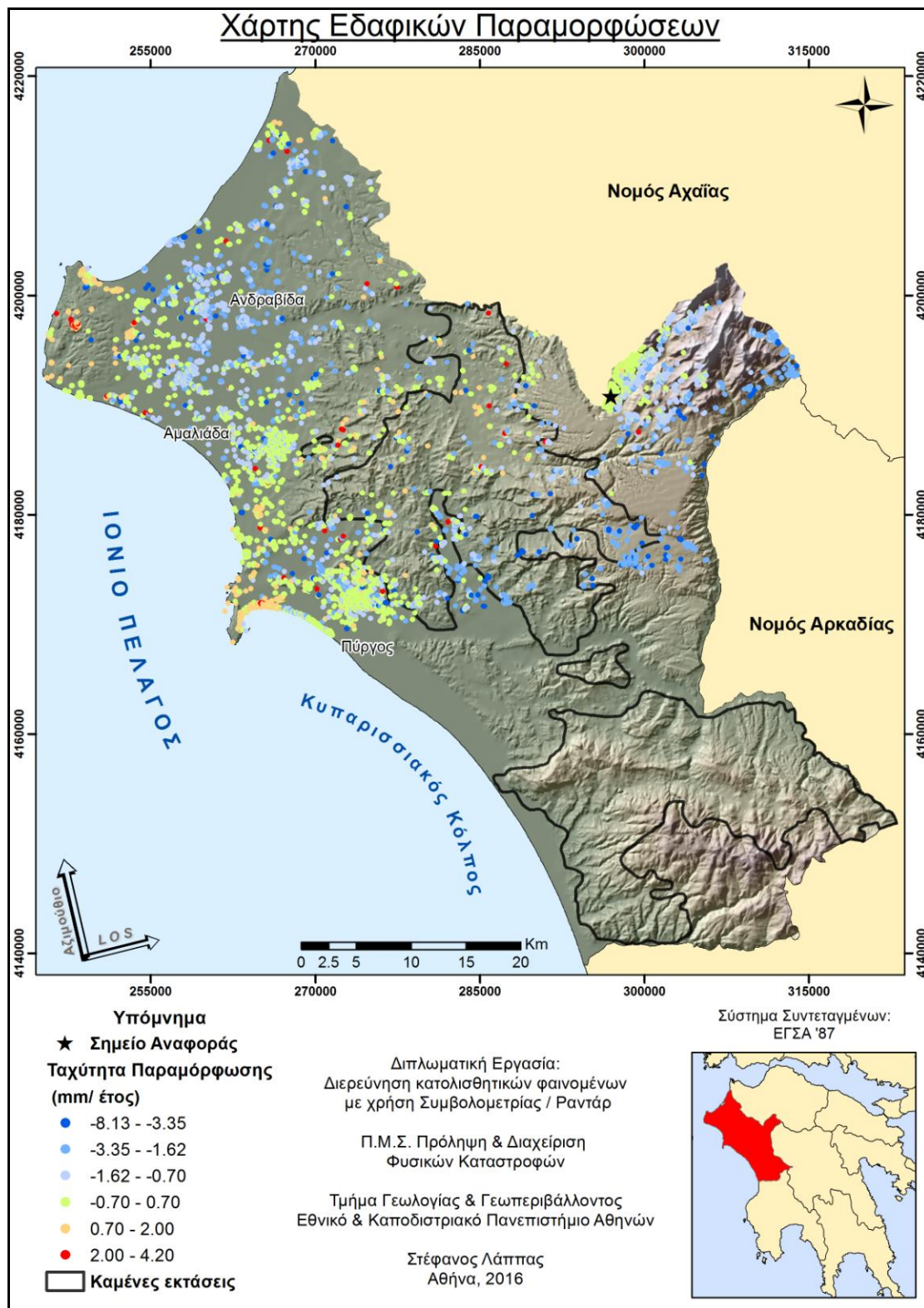
Για την εφαρμογή της μεθόδου SBAS, αρχικά, επιλέχθηκαν συνολικά 26 εικόνες της ανοδικής τροχιάς 186, εκ των οποίων αξιοποιήθηκαν οι 20, καθώς μόνο αυτές πληρούσαν τις παραμέτρους επεξεργασίας. Δημιουργήθηκαν συνολικά 56 διαφορεικά συμβολογραφήματα, από την επεξεργασία των οποίων προέκυψε η χρονοσειρά των επιφανειακών παραμορφώσεων και η μέση ταχύτητα παραμόρφωσης, όπως φαίνεται στον ακόλουθο χάρτη.

Κατά τον ορισμό των παραμέτρων καθορίστηκε και το σημείο αναφοράς, βάσει του οποίου θα υπολογίζονταν οι σχετικές παραμορφώσεις. Το σημείο αρχικά είχε οριστεί στο ανατολικό τμήμα του νομού, όπου εμφανίζεται το αλπικό υπόβαθρο με τους ασβεστόλιθους της Ενότητας Πίνδου. Το υπόβαθρο αυτό θεωρείται σταθερό συγκριτικά με τις τεταρτογενείς αποθέσεις που δομούν την υπόλοιπη περιοχή, καθώς δεν εμφανίζει φαινόμενα καθιζήσεων και κατολισθήσεων.

Ωστόσο, κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας, επιλέχθηκε διαφορετικό σημείο αναφοράς από τον αλγόριθμο περίπου 5 km δυτικότερα του αρχικού σημείου, εξαιτίας της χαμηλής συνάφειας του δεύτερου. Αυτό συνεπάγεται και διαφοροποίηση στα αποτελέσματα, οπότε για την διόρθωση του παραπάνω προβλήματος, πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση (calibration) των αποτελεσμάτων βάσει των τιμών των σημείων που αντιστοιχούσαν στους ασβεστόλιθους του αλπικού υποβάθρου. Οι αρχικές τιμές ήταν μεταξύ 0,042 έως 0,045 mm ανά έτος και ο μέσος όρος αυτών ήταν 0,0435 όπου αφαιρέθηκε από το σύνολο των τιμών των υπόλοιπων σημείων. Μ' αυτό τον τρόπο θεωρείται σαν σημείο αναφοράς το αλπικό γεωλογικό υπόβαθρο.

Αρχικά παρατηρείται ότι ο υπολογισμός της επιφανειακής παραμόρφωσης έχει πραγματοποιηθεί μόνο για τη βόρεια έκταση του νομού. Δεν έχουν υπολογιστεί σημεία πέρα μιας νοητής γραμμής νοτίως του Πύργου. Αυτό σημαίνει ότι η κοινή περιοχή μεταξύ των εικόνων περιορίζεται στο βόρειο τμήμα του νομού. Επίσης, η μετατόπιση υπολογίζεται μόνο για τα σημεία με συνάφεια μεγαλύτερη του 0,7. Οπότε, υπάρχει η πιθανότητα να μην υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός σημείων στην νότια Ηλεία με υψηλή συνάφεια, ώστε να υπολογιστεί η παραμόρφωση.

Στον Χάρτη 6.10 παρατηρούνται θετικές και αρνητικές τιμές στην ταχύτητα μετατόπισης. Αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ανύψωση και καθίζηση αντίστοιχα, καθώς οι μετατοπίσεις αυτές υπολογίζονται κατά μήκος της γραμμής θέασης του δορυφόρου (Line of Sight – LOS). Δηλαδή, οι θετικές τιμές σημαίνει ότι η περιοχή κινείται προς το δορυφόρο, ενώ οι αρνητικές ότι απομακρύνονται.



Χάρτης 6.10: Χάρτης μέσης ταχύτητας παραμόρφωσης, δεδομένων ανοδικής τροχιάς.

Το εύρος της ταχύτητας των μετατοπίσεων κυμαίνεται από $-8,13$ mm έως $5,2$ mm ανά έτος. Η πλειονότητα των σημείων εντοπίζεται εντός των αστικών περιοχών και οικισμών, το οποίο είναι λογικό καθώς οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές συνάφειας στο πέρασμα των ετών. Ιδιαίτερα εμφανής είναι η απουσία

σημείων εντός της καμένης έκτασης, γεγονός που δικαιολογείται από την απώλεια συνάφειας (αποσυσχέτιση) λόγω της μεταβολής της βλάστησης. Επίσης, περιορισμένος αριθμός σημείων διακρίνεται και στα ανατολικά της περιοχής, όπου επικρατεί έντονο ανάγλυφο και παρατηρούνται φαινόμενα γεωμετρικής παραμόρφωσης (σμίκρυνση, σκίαση).

Προκειμένου να καλυφθεί το κενό που δημιουργήθηκε από την περιορισμένη περιοχή κάλυψης των εικόνων, εκτελέστηκε εκ νέου ο αλγόριθμος SBAS για την περιοχή της νότιας Ηλείας. Το πρόβλημα ήταν ότι ορισμένες εικόνες με ίδια ημερομηνία λήψης χωρίζονταν σε δύο τμήματα, καλύπτοντας την βόρεια και την νότια περιοχή αντίστοιχα. Δεν ήταν δυνατή η επιλογή και των δύο εικόνων, με σκοπό την κάλυψη όλου του νομού, καθώς δεν είχαν κανένα κοινό σημείο μεταξύ τους. Συνέπεια ήταν η αυτόματη ακύρωση τους και αποτυχία του αλγορίθμου. Οπότε, για την αντιμετώπιση του προβλήματος επιλέχθηκαν οι εικόνες που αντιστοιχούσαν στο νότιο τμήμα του νομού.

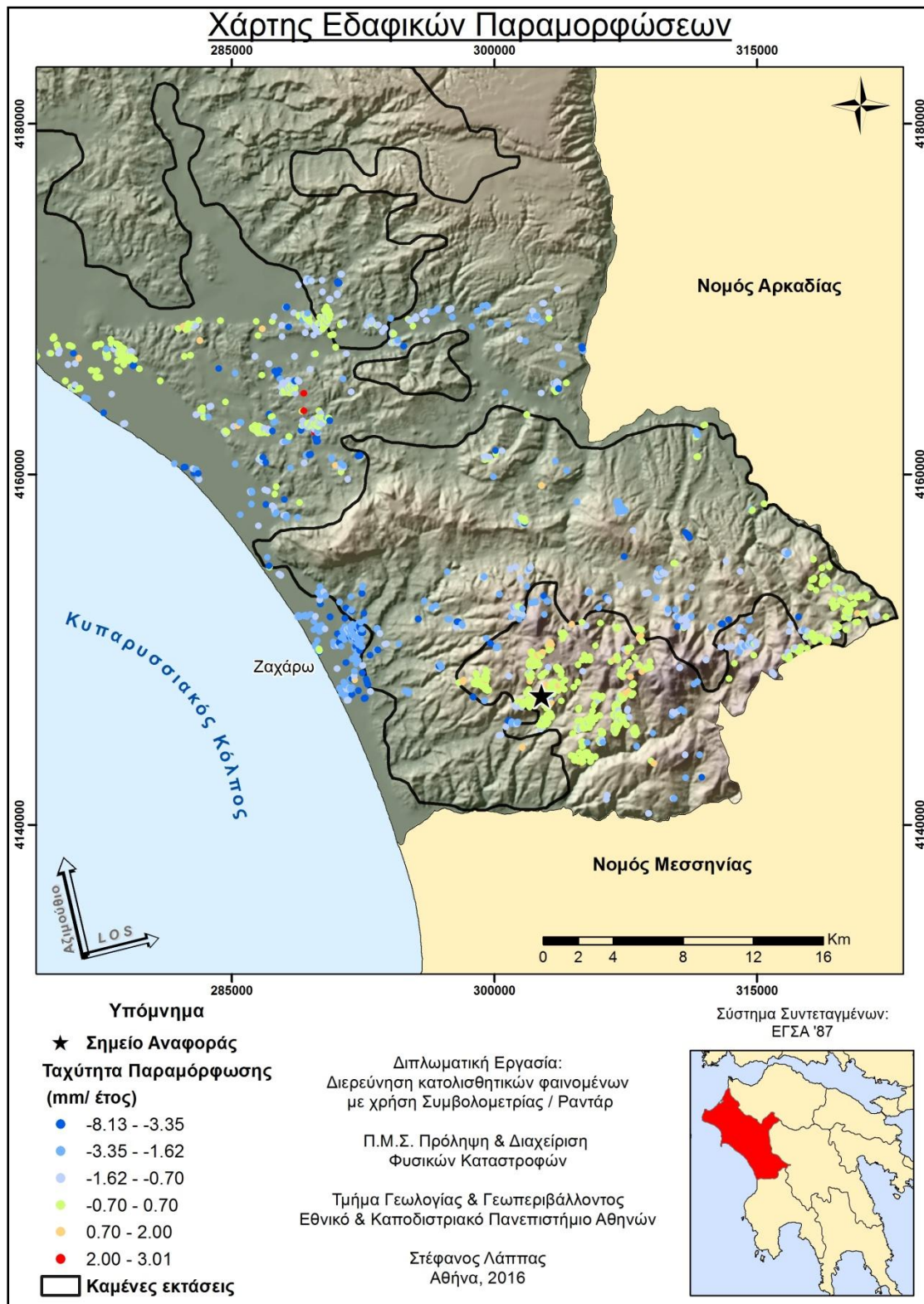
Για την επιλογή του σημείου αναφοράς αναζητήθηκε παρόμοιο γεωλογικό υπόβαθρο. Η βέλτιστη περιοχή ήταν το νότιο άκρο του νομού όπου εμφανίζεται εξίσου η γεωτεκτονική ενότητα Πίνδου, με τους ασβεστόλιθους αλπικής ηλικίας. Το υπόβαθρο αυτό θεωρείται σταθερό και με παρόμοια συμπεριφορά με προηγούμενο, καθώς ανήκει στην ίδια ενότητα.

Όπως παρατηρείται στον χάρτη, τα σημεία εκτίμησης της παραμόρφωσης σταματούν σε μια νοητή γραμμή νοτίως του Πύργου. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, εξαιτίας της περιορισμένης περιοχής κάλυψης μεταξύ των εικόνων. Το γεγονός αυτό αποτρέπει την ακριβή συσχέτιση των δύο αποτελεσμάτων μεταξύ της βόρειας και της νότιας Ηλείας. Επίσης, δεν δίνεται η δυνατότητα βαθμονόμησης ενός σετ αποτελεσμάτων βάσει του άλλου, καθώς τα σημεία αναφοράς δεν βρίσκονται στο ίδιο ακριβώς σημείο (υψόμετρο). Παρόλα αυτά ορισμένες συγκρίσεις μπορούν να γίνουν με ασφάλεια, καθώς πρόκειται για δύο αλπικά υπόβαθρα με παρόμοιους σχηματισμούς (ασβεστόλιθοι).

Είναι εμφανές ότι η ευρύτερη περιοχή γύρω από το σημείο αναφοράς, που βρίσκεται στο ίδιο γεωλογικό υπόβαθρο παρουσιάζει πολύ μικρές ταχύτητες μετατόπισης, θεωρώντας αυτή την περιοχή σταθερή. Αντίστοιχα, περιοχές με παρόμοιες ταχύτητες εντοπίζονται και νότια της πόλης του Πύργου, γεγονός που συμπίπτει μερικώς με τα προηγούμενα αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι η ευρύτερη περιοχή είναι σταθερή, όπως παρατηρήθηκε και προηγουμένως (πόλη του Πύργου).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η πόλη της Ζαχάρω, όπου χαρακτηρίζεται από αρνητικές τιμές μετατόπισης. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή καθιζάνει σε σχέση με το σημείο αναφοράς στο αλπικό υπόβαθρο. Λαμβάνοντας υπόψη το γεωλογικό υπόβαθρο στο οποίο βρίσκεται η Ζαχάρω μπορεί να εξηγηθεί η αρνητική παραμόρφωση που εμφανίζει. Η ευρύτερη περιοχή δομείται από αλλουβιακές ολοκαινικές αποθέσεις, ενώ προς την ακτογραμμή εναλλάσσονται με παραθαλάσσιες

θίνες. Οι σχηματισμοί αυτοί δεν έχουν συνοχή και με την διαχρονική επιφόρτιση καθιζάνουν από το βάρος των υποδομών.



Χάρτης 6.11: Χάρτης μέσης ταχύτητας παραμόρφωσης, δεδομένων ανοδικής τροχιάς

Τέλος, παρατηρούνται πολλά σημεία με αρνητική μετατόπιση στο κεντρικό τμήμα της περιοχής που απεικονίζεται, ανάμεσα στις δύο καμένες εκτάσεις. Η περιοχή δομείται από τεταρτογενείς αποθέσεις και πιο συγκεκριμένα από την Βαθμίδα του Βούναργου, που αποτελείται από εναλλαγές άμμων και αργιλούχων αποθέσεων. Τα ιζήματα αυτά παρουσιάζουν πολύ μικρή συνοχή και είναι επιρρεπή σε κατολισθητικά φαινόμενα. Μάλιστα, στην περιοχή αυτή βρίσκονται τα χωριά Φρίξα και Γρύλλος, τα οποία είναι γνωστά για τον μεγάλο ρυθμό ολίσθησής τους, καθώς έχει προταθεί και μετεγκατάστασή τους, λόγω του προβλήματος. Δυστυχώς όμως, εντός των οικισμών αυτών δεν υπολογίστηκε η παραμόρφωση, το οποίο μπορεί να οφείλεται στην χαμηλή συνάφεια ή στην γεωμετρία λήψης του δορυφόρου.

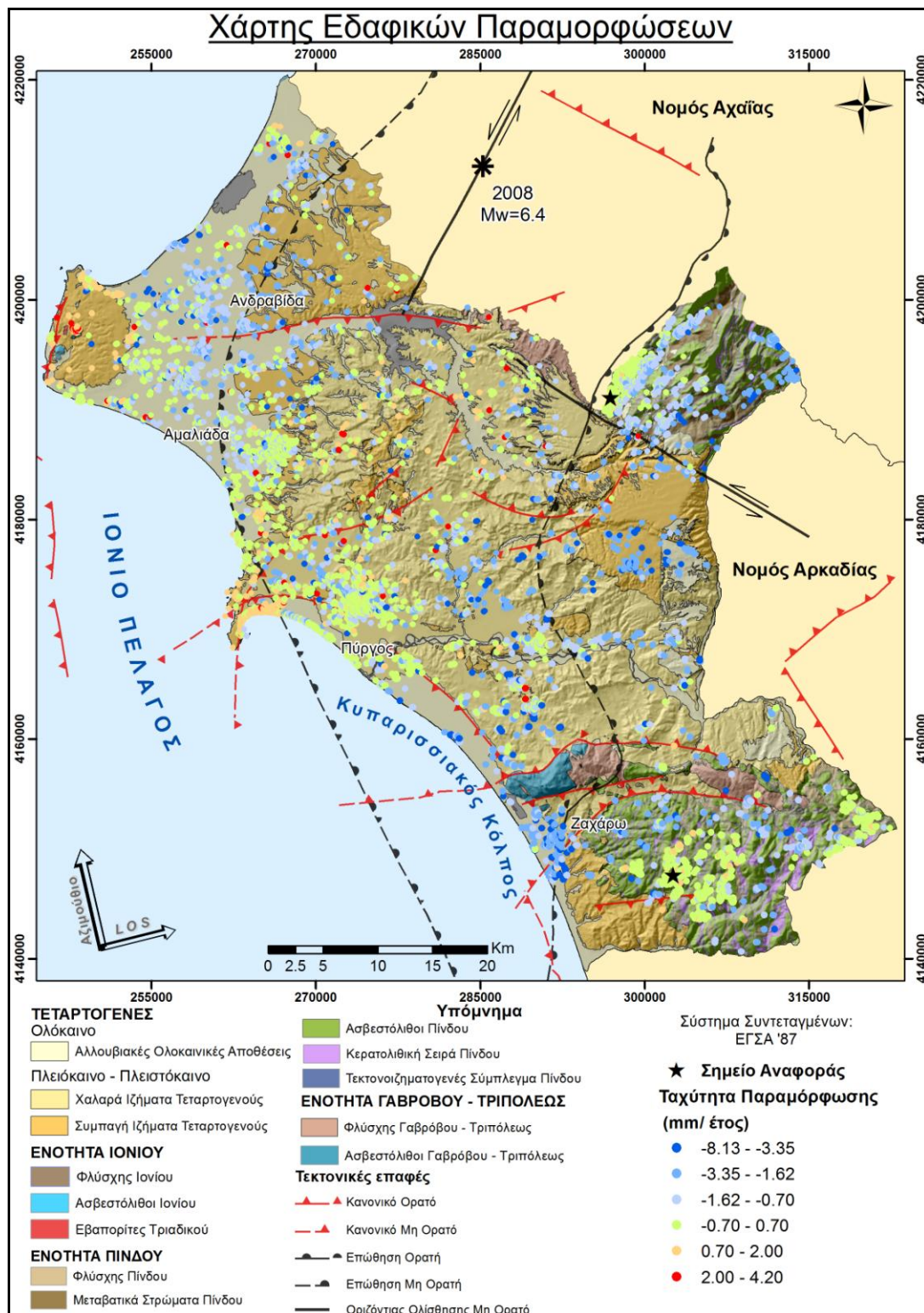
Ωστόσο, αρκετά σημεία αρνητικής μετατόπισης εντοπίζονται εντός της νότιας καμένης έκτασης. Βέβαια, ο αριθμός τους είναι μικρός και οφείλεται στην απώλεια συνάφειας του σήματος εξαιτίας της μεταβολής της βλάστησης. Τα περισσότερα σημεία εντοπίζονται στο νότιο τμήμα, όπου επικρατεί το ασβεστολιθικό υπόβαθρο, που χαρακτηρίζεται από υψηλή συνάφεια. Στην περιοχή αυτή υπάρχει έντονη παρουσία του φλύσχη, όπου παρουσιάζει κακή μηχανική συμπεριφορά. Σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της πυρκαγιάς, προκάλεσε πολλές νέα κατολισθήσεις, αλλά και ενεργοποίησε ορισμένες παλιές.

Εντός της περιοχής ξεχωρίζουν οι περιοχές γύρω από τους οικισμούς Ροδινά και Αλίφειρα. Μάλιστα στους οικισμούς αυτούς έχουν καταγραφεί φαινόμενα κατολίσθησης, τόσο από μελέτες του Ι.Γ.Μ.Ε, όσο και από την έρευνα του εργαστηρίου Φυσικών Καταστροφών.

Η πόλη του Πύργου, αλλά και της Αμαλιάδας χαρακτηρίζονται από πολύ μικρές ταχύτητες παραμόρφωσης, είτε θετικές, είτε αρνητικές, της τάξης των $\pm 0,5$ mm. Λόγω του μικρής ταχύτητας, αυτές οι περιοχές θεωρούνται σταθερές. Επίσης, σταθερή θεωρείται και η περιοχή στο ασβεστολιθικό υπόβαθρο ανατολικά του νομού, όπου λήφθηκε και το σημείο αναφοράς.

Αρνητική παραμόρφωση παρουσιάζει η περιοχή που αντιστοιχεί στην πεδιάδα των Λεχαινών και Ανδραβίδας στο βόρειο τμήμα του νομού. Οι ταχύτητες ωστόσο είναι πολύ μικρές της τάξης ~ 1 mm/έτος, ενώ σε ορισμένες μεμονωμένες περιπτώσεις αγγίζουν τα 5 mm/έτος. Η περιοχή αυτή αντιστοιχεί σε μια λεκάνη που χαρακτηρίζεται από πολύ ήπιο ανάγλυφο και δομείται εξ ολοκλήρου από αλλουβιακές ολοκαινικές αποθέσεις.

Χαρακτηριστική είναι η μετάβαση των ταχυτήτων παραμόρφωσης από δυτικά προς τα ανατολικά. Στα δυτικά που επικρατούν οι ασβεστόλιθοι της Ιονίου Ζώνης παρουσιάζουν θετικές τιμές παραμόρφωσης, ενώ κινούμενοι προς τα ανατολικά οι ταχύτητες μειώνονται. Στο όριο μεταξύ των ασβεστόλιθων και των αποθέσεων οι ταχύτητες είναι σχεδόν μηδενικές, ενώ προχωρώντας στο εσωτερικό της λεκάνης αυξάνονται.



Χάρτης 6.12: Γεωλογικός χάρτης και μέση ταχύτητα παραμόρφωσης.

Οι αρνητικές τιμές αποδίδονται στην σύμπτυξη και συμπίεση των αλλουβιακών αποθέσεων με το πέρασμα των ετών. Επίσης, μπορεί να οφείλεται στην καθίζηση του εδάφους εξαιτίας της πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα, από την υπεράντληση των υπόγειων υδάτων από του καλλιεργητές της περιοχής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή του Κατάκολου, όπου είναι σαφής η διαφοροποίηση μεταξύ των θετικών και αρνητικών τιμών παραμόρφωσης. Παρόλο που η περιοχή δομείται από θίνες και χαλαρά τεταρτογενή ιζήματα, το δυτικό τμήμα παρουσιάζει ανύψωση, ενώ το ανατολικό καθίζηση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την ύπαρξη ενός ανάστροφου ρήγματος το οποίο τέμνει την περιοχή ακριβώς στο όριο μεταξύ των τιμών παραμόρφωσης.

Στην υπόλοιπη περιοχή και πιο συγκεκριμένα εντός της καμένης έκτασης, παρόλο που υπάρχουν λίγα σημεία, η πλειονότητα αυτών χαρακτηρίζεται από αρνητικές τιμές παραμόρφωσης. Η ταχύτητα των σημείων κυμαίνεται από -2 έως -7 mm ανά έτος. Το σύνολο της περιοχής δομείται από τεταρτογενείς αποθέσεις, κυρίως εναλλαγές χαλαρών και συμπαγών ιζημάτων. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι ιδιαίτερα επιρρεπείς σε κατολισθητικά φαινόμενα, σε συνδυασμό με εντονότερο ανάγλυφο.

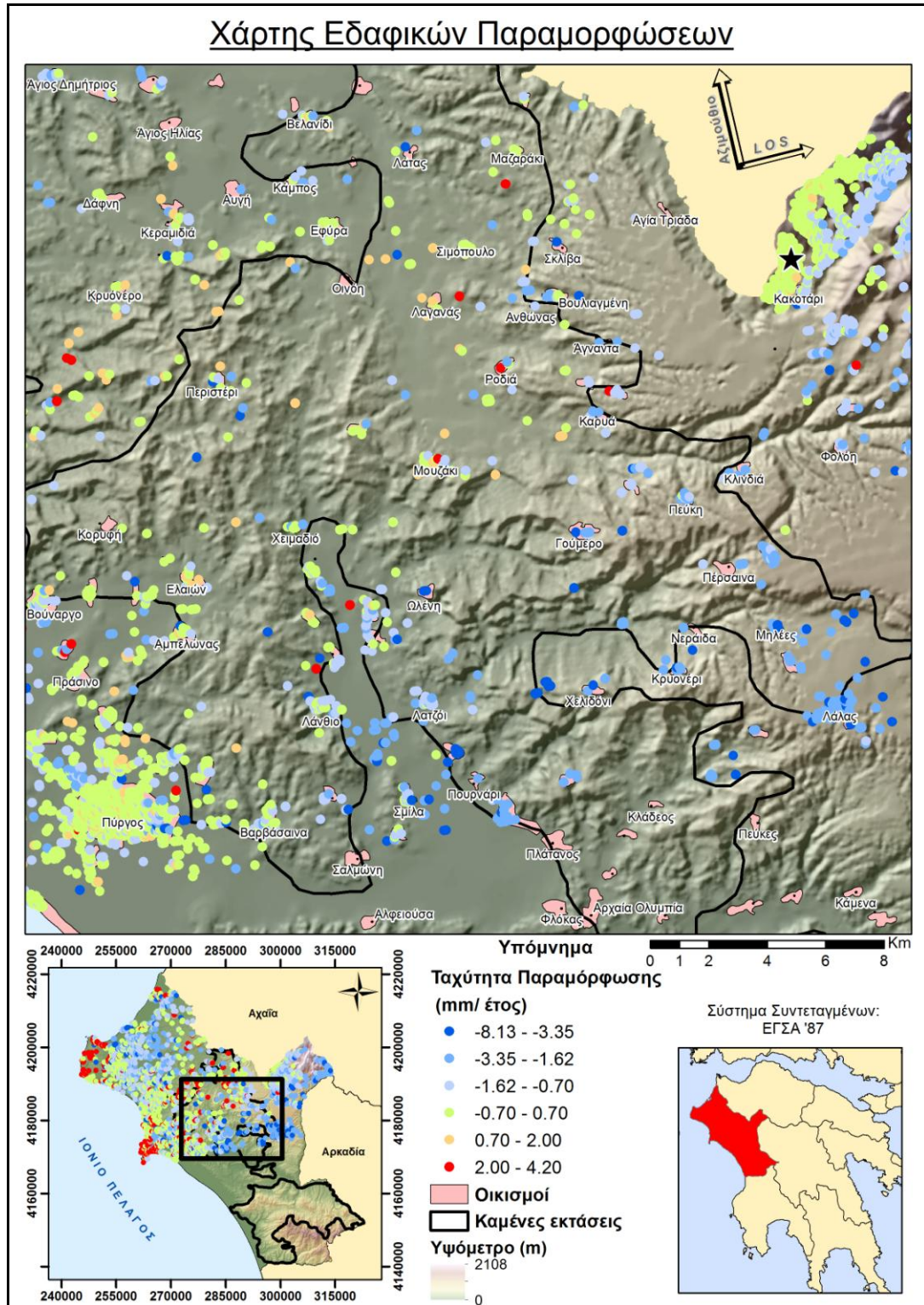
Η περιοχή αυτή είναι γνωστή για τα προβλήματα κατολισθήσεων, καθώς έχουν καταγραφεί αρκετά συμβάντα. Ταυτόχρονα, η επίδραση της μεγάλης πυρκαγιάς που σημειώθηκε το 2007 επέτεινε το πρόβλημα, αυξάνοντας τον αριθμό των αστοχιών. Η αφαίρεση της βλάστησης συνεπάγεται απώλεια συγκράτησης του εδαφικού ορίζοντα, αλλά και απώλειας συγκράτησης του επιφανειακού νερού. Επιπλέον, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν, άλλαξε και η χημική σύσταση του εδάφους, δημιουργώντας ένα υδροφοβικό στρώμα κάτω από το καμένο έδαφος. Αποτέλεσμα είναι να είναι η εντατικοποίηση της εδαφικής διάβρωσης λόγω βροχοπτώσεων, ιδιαίτερα την χειμερινή περίοδο.

Εστιάζοντας στην περιοχή, παρατηρείται ότι πολλά σημεία αντιστοιχούν σε οικισμούς, γεγονός που δικαιολογείται από την υψηλή συνάφεια του σήματος. Εντός της περιοχής εντοπίζονται 233 σημεία με αρνητική μετατόπιση, εκ των οποίων 110 βρίσκονται εντός των οικισμών και 32 σε απόσταση μικρότερων των 50 μέτρων από το οδικό δίκτυο. Άρα προκύπτει ότι τα μισά και παραπάνω σημεία με αρνητική τιμή παραμόρφωσης επηρεάζονται από ανθρωπογενείς διεργασίες. Το παραπάνω έχει διττή σημασία καθώς εφ' ενός πλήττονται πολλοί οικισμοί και υποδομές από φαινόμενα παραμόρφωσης, αλλά από την άλλη πολλά από αυτά τα φαινόμενα μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη των υποδομών αυτών.

Σε πολλές περιπτώσεις κατά την διάνοιξη δρόμων υποσκάπτονται τα πρηνή των πλαγιών, αποδυναμώνοντας τον πόδα του πρηνούς, οδηγώντας στην εκδήλωση κατολίσθησης. Επίσης, παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται και κατά την ανοικοδόμηση οικημάτων. Επιπλέον τα οικήματα αυξάνουν το βάρος σε περιπτώσεις που έχουν θεμελιωθεί σε ολισθαίνουσα μάζα, επιτείνοντας το φαινόμενο.

Οι οικισμοί που χαρακτηρίζονται από αρνητική μετατόπιση μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες βάσει της μετρούμενης ταχύτητας παραμόρφωσης. Οι οικισμοί με μικρή ταχύτητα (μέχρι -2,5 mm/ έτος) και οικισμοί με μεγάλη ταχύτητα παραμόρφωσης (άνω των -2,5 mm/ έτος). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι οικισμοί Καρατούλας, Αρβανίτες, Λάνθιο, Πελόπιο Αγ. Άννα, Καρυά και Βαρβάσινα.

Αντίθετα, στην δεύτερη ομάδα εντάσσονται οι οικισμοί Γούμερο, Ωλένη, Μηλιές, Λάλας, Κούμανη, Περιστερί, Πεύκη και Ηράκλεια. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στους πέντε πρώτους από τους προηγούμενους οικισμούς έχουν αναφερθεί και καταγραφεί κατολισθητικά φαινόμενα. Τα φαινόμενα σχετίζονται με κάποιες καθιζήσεις εντός των οικισμών, αλλά και με αστοχίες στα πρηνή των δρόμων που συνδέουν τους παραπάνω οικισμούς.



Χάρτης 6.13: Μέση ταχύτητα παραμόρφωσης εντός της βόρειας καμένης έκτασης.

Αποτελέσματα Καθοδικής Τροχιάς

Μετά τα αποτελέσματα της ανοδικής τροχιάς, εκτελέστηκε η τεχνική SBAS χρησιμοποιώντας τις απεικονίσεις της καθοδικής τροχιάς 279. Σαν δεδομένα ορίστηκαν 30 εικόνες, εκ των οποίων 22 πληρούσαν τις προϋποθέσεις επεξεργασίας και δημιουργήθηκαν 60 διαφορεικά συμβολογραφήματα. Βάσει αυτών των συμβολογραφημάτων προέκυψε η χρονοσειρά επιφανειακών παραμορφώσεων, καθώς και η μέση ταχύτητα παραμόρφωσης.

Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα από τα δεδομένα των δύο τροχιών (ανοδική και καθοδική) επιλέχθηκε το ίδιο σημείο αναφοράς. Το σημείο ορίστηκε εκ νέου στο αλπικό υπόβαθρο που εμφανίζεται στα ανατολικά του νομού και πιο συγκεκριμένα στους ασβεστόλιθους της γεωτεκτονικής ενότητας Πίνδου. Οπότε, οι παραμορφώσεις που θα προκύψουν θα είναι σχετικές ως προς αυτό το σημείο και άρα συγκρίσιμες με αυτές που προέκυψαν παραπάνω. Αντίστοιχα, οι θετικές και αρνητικές τιμές μετατόπισης αντιστοιχούν σε κίνηση προς και μακριά από τον δορυφόρο στην διεύθυνση θέασης αυτού (LOS). Η γραμμή θέασης του δορυφόρου καθοδικής τροχιάς είναι διεύθυνσης ΔΒΔ – ΑΝΑ.

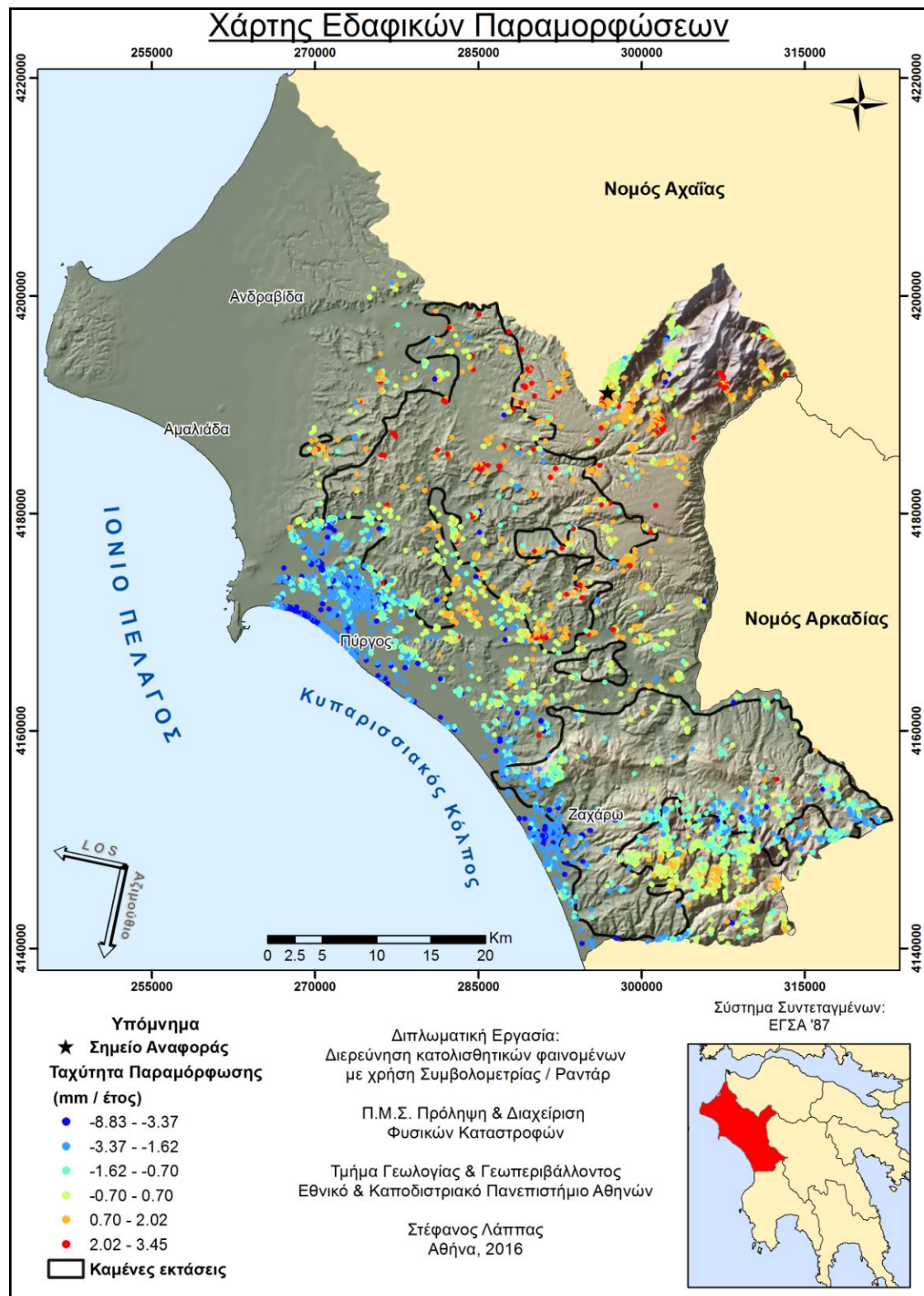
Παρατηρώντας τον χάρτη επιφανειακών παραμορφώσεων που προέκυψε από τα δεδομένα της καθοδικής τροχιάς είναι εμφανής η διαφορά με τον προηγούμενο χάρτη. Αρχικά διακρίνεται ότι τα σημεία που έχει υπολογιστεί η παραμόρφωση σταματούν λίγο βορειότερα του Πύργου. Αυτό, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, οφείλεται στην περιορισμένη κοινή περιοχή κάλυψης των εικόνων.

Αντιθέτως, καλύπτεται πλήρως το νότιο τμήμα του Νομού Ηλείας, όπου στην προηγούμενη περίπτωση υπήρχαν ελάχιστα σημεία. Αυτό αποδεικνύει το γεγονός ότι η περιοχή επηρεάζεται έντονα από φαινόμενα γεωμετρικής παραμόρφωσης, αλλά και από αποσυσχέτιση του σήματος, μειώνοντας τον αριθμό σημείων με υψηλή συνάφεια σήματος.

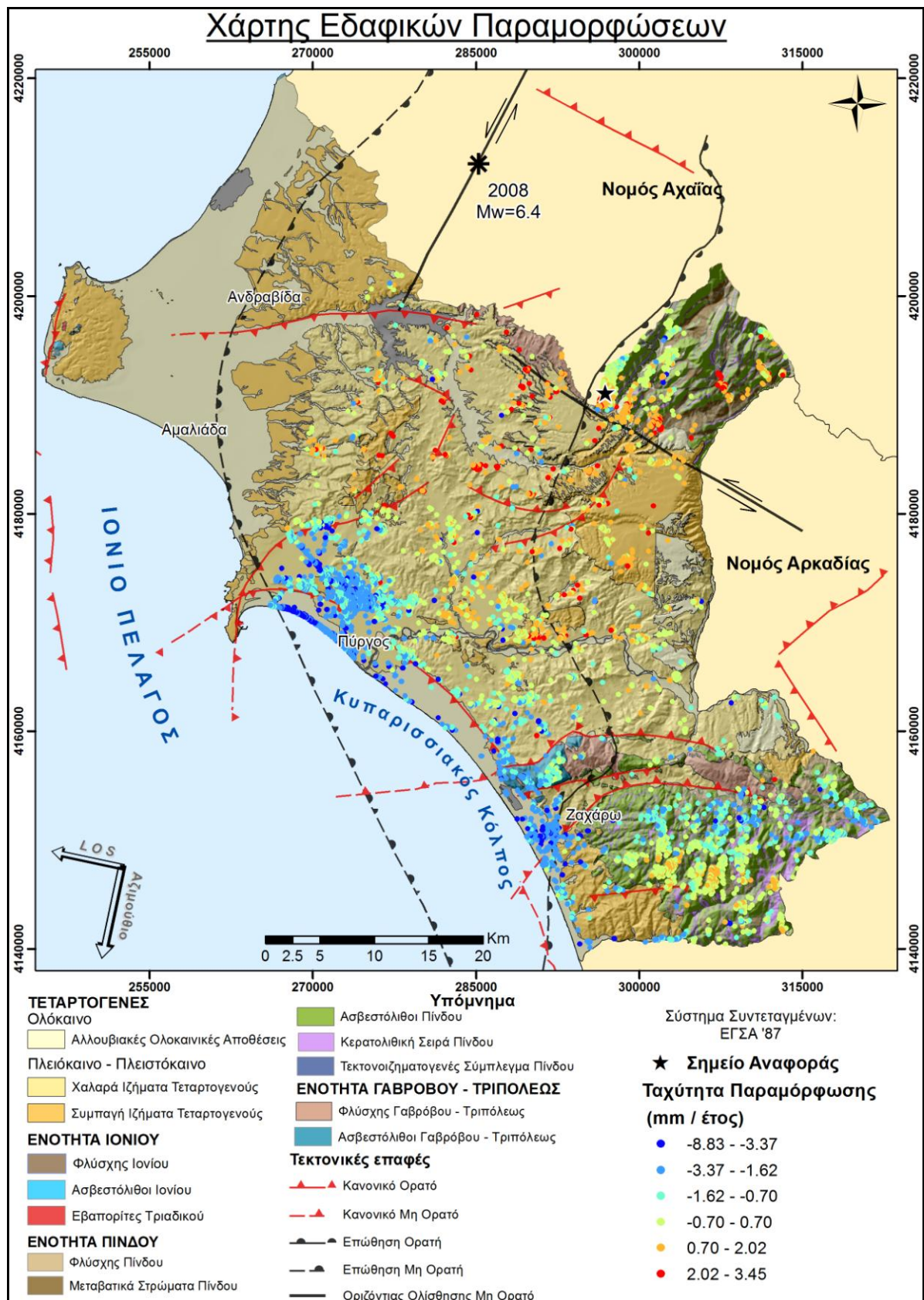
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η πλειονότητα των σημείων εντοπίζεται εντός των αστικών περιοχών και των οικισμών, ενώ διάσπαρτα σημεία αντιστοιχούν σε μεμονωμένα οικοδομήματα ή μεγάλα τεμάχια βράχων με υψηλή οπισθοσκέδαση σήματος. Επίσης μεγάλη πολλά σημεία εντοπίζονται στις περιοχές που επικρατεί το αλπικό υπόβαθρο, το οποίο αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθους, που χαρακτηρίζονται από υψηλή διαχρονική συνάφεια. Αντίθετα, εντός των καμένων εκτάσεων ο αριθμός των σημείων παραμόρφωσης είναι πολύ μικρότερος, γεγονός που οφείλεται στην μικρή συνάφεια που προκλήθηκε από την απώλεια σήματος.

Περιοχές με πολύ μικρή ταχύτητα μετατόπισης (-0.7 έως 0.7 mm/ έτος) μπορούν να χαρακτηριστούν σταθερές. Αυτές εντοπίζονται γύρω από το σημείο αναφοράς, στα ανατολικά του νομού, αλλά και στο νότιο άκρο, όπου υπάρχει μεγάλη πυκνότητα σημείων. Οι δύο αυτές περιοχές βρίσκονται στο ίδιο γεωλογικό υπόβαθρο, όπου επικρατεί η γεωτεκτονική ενότητα της Πίνδου, με εμφανίσεις ασβεστόλιθων, ραδιολαριτών και φλύσχη. Το γεγονός ότι εμφανίζουν παρόμοιες τιμές μετατόπισης,

σημαίνει ότι δεν υπάρχει μεγάλη σχετική κίνηση μεταξύ τους, το οποίο είναι και αναμενόμενο.



Χάρτης 6.14: Χάρτης μέσης ταχύτητας παραμόρφωσης, δεδομένων καθοδικής τροχιάς



Χάρτης 6.15: Γεωλογικός χάρτης και μέση ταχύτητα παραμόρφωσης δεδομένων καθοδικής τροχιάς

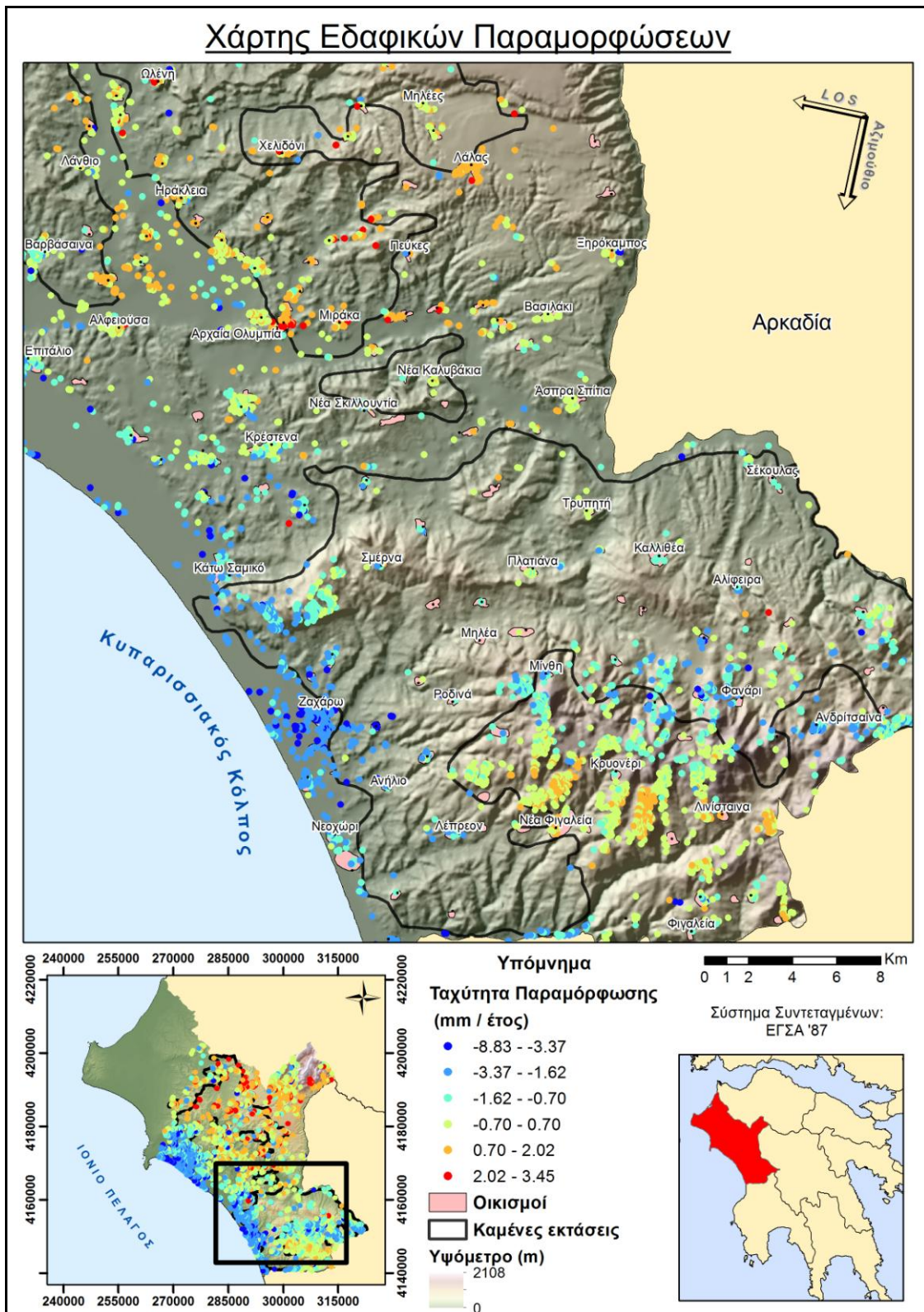
Ιδιαίτερο ενδιαφέρει παρουσιάζουν οι δύο μεγάλες πόλεις της περιοχής, η πόλη του Πύργου και της Ζαχάρως νοτιότερα. Και οι δύο πόλεις χαρακτηρίζονται από μεγάλο αριθμό σημείων με αρνητική μετατόπιση όμως. Το υπόβαθρο της Ζαχάρως αποτελείται από ολοκαινικές αποθέσεις χαμηλής συνοχής. Με το πέρασμα των ετών τα χαλαρά ολοκαινικά ιζήματα συμπαγοποιούνται από το βάρος των κτιρίων, οπότε είναι αναμενόμενη η αρνητική μετατόπιση.

Αξιοσημείωτη όμως είναι η περίπτωση της πόλης του Πύργου, όπου εμφανίζει μικρές έως μεσαίες ταχύτητες αρνητικής παραμόρφωσης, που σημαίνουν ότι απομακρύνεται από τον δορυφόρο. Στα αποτελέσματα της ανοδικής τροχιάς ο Πύργος παρουσιαζόταν σταθερός, με πολύ μικρές αρνητικές μετατοπίσεις. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι πιθανότατα η πόλη του Πύργου να εμφανίζει κάποιο βαθμό καθίζησης, ο οποίος γίνεται αντιληπτός κυρίως από γεωμετρία λήψης της καθοδικής τροχιάς. Παράλληλα, αυτή η διαφοροποίηση της παραμόρφωσης μεταξύ των δύο τροχιών, σημαίνει ότι υπάρχει και οριζόντια συνιστώσα στην συνολική παραμόρφωση της περιοχής.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το νότιο τμήμα του νομού, όπου ένα μέρος του χαρακτηρίζεται από αρνητική παραμόρφωση. Εκτός των ασβεστόλιθων και των ραδιολαριτών που επικρατούν, στην περιοχή εμφανίζεται και ο Φλύσχης της Πίνδου. Ο φλύσχης είναι γνωστός για τα κατολισθητικά φαινόμενα που καταγράφονται, καθώς χαρακτηρίζεται από κακή μηχανική συμπεριφορά, η οποία μειώνεται με την επίδραση των βροχοπτώσεων.

Με προσεκτική παρατήρηση των σημείων, διακρίνεται ότι πολλά από αυτά εμπίπτουν εντός της καμένης έκτασης της πυρκαγιάς του 2007. Αποτέλεσμα της πυρκαγιάς είναι η εντατικοποίηση του φαινομένου των κατολισθήσεων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, λόγω απώλειας της βλάστησης. Ιδιαίτερα στα σημεία που βρίσκονται στον φλύσχη, ο αριθμός των αστοχιών αναμένεται να μεγαλύτερος και με μεγαλύτερη ταχύτητα παραμόρφωσης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι εντοπίζονται τρεις περιοχές με ικανοποιητικό αριθμό σημείων αρνητικής μετατόπισης εκτός των οικισμών. Αυτές οι μικρές περιοχές θα μπορούσαν να αποδοθούν σε μάζες που ολισθαίνουν, καθώς ακολουθούν και την φορά κλίσης του πρανούς.

Εντός της καμένης έκτασης χαρακτηριστικές είναι οι περιοχές γειτονικά των οικισμών Αλιφείρα, Καλλιθέα και Ροδινά, όπου εμφανίζουν μεγάλο αριθμό σημείων με αρνητική μετατόπιση. Οι οικισμοί αυτοί εμφάνισαν αρνητικές τιμές και στα αποτελέσματα της ανοδικής τροχιάς, γεγονός που σημαίνει ότι προφανώς ολισθαίνουν προς τα κάτω. Όπως προαναφέρθηκε και προηγουμένως, στους οικισμούς αυτούς έχουν καταγραφεί κατολισθητικά φαινόμενα.



Χάρτης 6.16: Μέση ταχύτητα παραμόρφωσης εντός της νότιας καμένης έκτασης

Αναφορικά με την βόρεια καμένη έκταση του νομού, η κατανομή των σημείων εντός της περιοχής είναι σχεδόν η ίδια με την προηγούμενη, γεγονός που σημαίνει ότι δεν διαφοροποιούνται τα σημεία με υψηλή συνάφεια μεταξύ των δύο τροχιών. Τα περισσότερα σημεία αντιστοιχούν σε οικισμούς, καθώς αυτοί διατηρούν υψηλή συνάφεια του σήματος.

Εντύπωση προκαλεί το γεγονός ότι τα περισσότερα σημεία που εμπίπτουν σ' αυτή παρουσιάζουν θετικές τιμές παραμόρφωσης. Οι θετικές τιμές δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ανύψωση, αλλά κίνηση της περιοχής προς τον δορυφόρο. Στα προηγούμενα αποτελέσματα τα περισσότερα σημεία χαρακτηρίζονταν από αρνητικές τιμές μετατόπισης. Αυτή η διαφοροποίηση συνεπάγεται μια οριζόντια συνιστώσα της μετατόπισης, η οποία αποδεικνύεται από τις δύο διαφορετικές τροχιές. Βέβαια οι θετικές τιμές είναι πολύ μικρότερες (0 έως 2.3 mm / έτος) από τις αρνητικές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως (έως -8 mm/ έτος). Οι οικισμοί που παρουσιάζουν θετική μετατόπιση εντός της περιοχής είναι οι ίδιοι με τα προηγούμενα αποτελέσματα.

Ανάλυση Χρονοσειρών

Αναλύοντας περαιτέρω τα αποτελέσματα της τεχνικής SBAS, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση χρονοσειρών μετατόπισης. Φυσικά ήταν αδύνατο να μελετηθούν οι χρονοσειρές όλων των σημείων, γι' αυτόν τον λόγο επιλέχθηκαν ορισμένες χαρακτηριστικές περιοχές που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Αρχικά επιλέχθηκαν ορισμένες περιοχές εντός της λεκάνης της Ανδραβίδας, για να μελετηθεί η διαχρονική εξέλιξη της αρνητικής παραμόρφωσης που παρουσιάζεται, αλλά κυρίως να διερευνηθεί αν είχε επίπτωση στις μετατοπίσεις ο σεισμός που σημειώθηκε το 2008 της ανατολικά της Ανδραβίδας.

Επίσης, για να διερευνηθεί αν οι πυρκαγιές του 2007 είχαν επίπτωση στην εξέλιξη της παραμόρφωσης, μελετήθηκαν οι χρονοσειρές περιοχών με αρνητική μετατόπιση, τόσο εντός των καμένων εκτάσεων, όσο και εκτός αυτών. Η ανάλυση των χρονοσειρών περιλαμβάνει την κατασκευή διαγραμμάτων όπου απεικονίζεται η διαχρονική μετατόπιση για κάθε έτος. Για την ακρίβεια παρουσιάζεται η μετατόπιση που προκύπτει για κάθε ημερομηνία που λήφθηκε μια εικόνα SAR. Οι μετατοπίσεις κάθε απεικόνισης αναφέρονται πάντα σύμφωνα με την πρώτη απεικόνιση και όχι με την προηγούμενή της. Δηλαδή, όλες οι μετρήσεις λαμβάνουν σαν σημείο αναφοράς την αρχική εικόνα, θεωρώντας σταθερή την περιοχή κατά την πρώτη ημερομηνία.

Για την ανάλυση των χρονοσειρών υπολογίστηκε κάθε φορά ο μέσος όρος των τιμών μετατόπισης των σημείων που απαρτίζουν την εκάστοτε περιοχή. Οι περιοχές που μελετήθηκαν είναι πολύ μικρές της τάξης μερικών δεκάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων και συνήθως αποτελούνταν από 15 - 15 σημεία περίπου. Οι τιμές των σημείων παρουσίαζαν πολύ μικρή διακύμανση μεταξύ των ετών, οπότε ήταν στατιστικά ασφαλές η εξαγωγή του μέσου όρου αυτών. Ταυτόχρονα, μ' αυτή τη μέθοδο απαλείφονται και τυχόν σφάλματα του υπολογισμού της μετατόπισης.

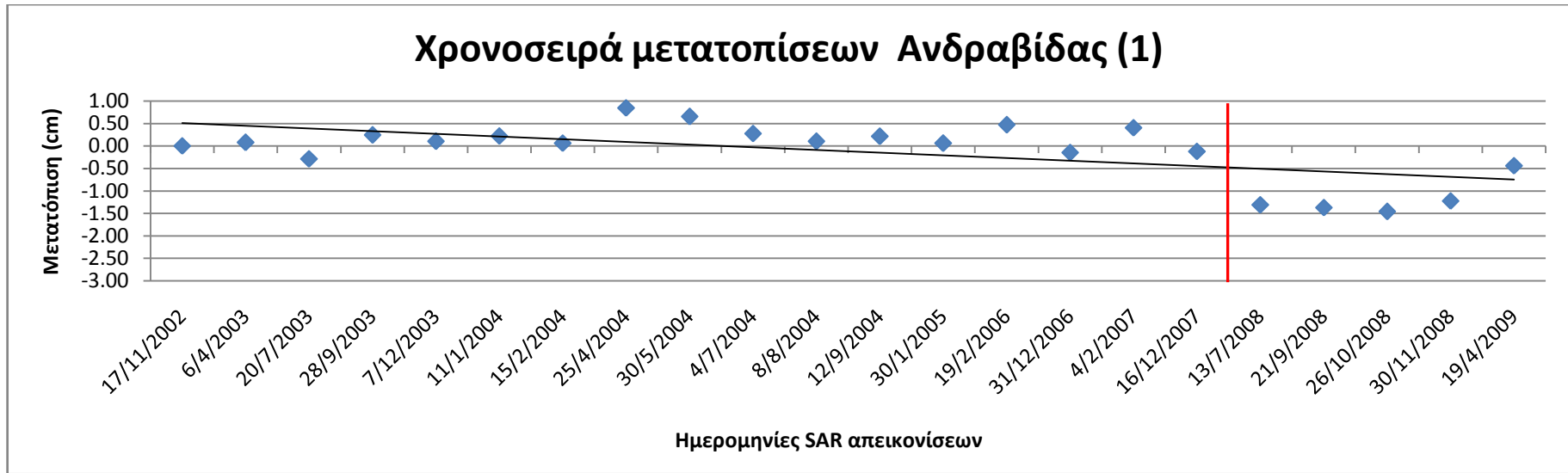
Αρχικά, παραθέτονται τα διαγράμματα δύο περιοχών εντός της λεκάνης της Ανδραβίδας, καθώς επίσης και του οικισμού του Αγίου Δημητρίου που βρίσκεται εντός της λεκάνης.

Εξετάζοντας το Διάγραμμα 1, παρατηρείται ότι η περιοχή εμφανίζει διαχρονικά μικρή αρνητική μετατόπιση. Οι τιμές των μετατοπίσεων κάθε ημερομηνίας δεν είναι πολύ μεγάλες, γεγονός που προσδίδει ένα σταθερό ρυθμό μετατόπισης. Οι θετικές τιμές που παρατηρούνται ανήκουν στα όρια του σφάλματος και δεν αλλάζουν την γενική εικόνα που προκύπτει. Όμως προκαλεί ιδιαίτερη εντύπωση η μεγάλη διαφοροποίηση στην χρονοσειρά στις 13/07/2008. Την ημερομηνία αυτή καταγράφεται μια μεγάλη μετατόπιση της τάξης του ~1 χιλιοστού. Παράλληλα, όλες μετρήσεις εντός του 2008 καταγράφουν πολύ μεγάλες τιμές αρνητικής μετατόπισης.

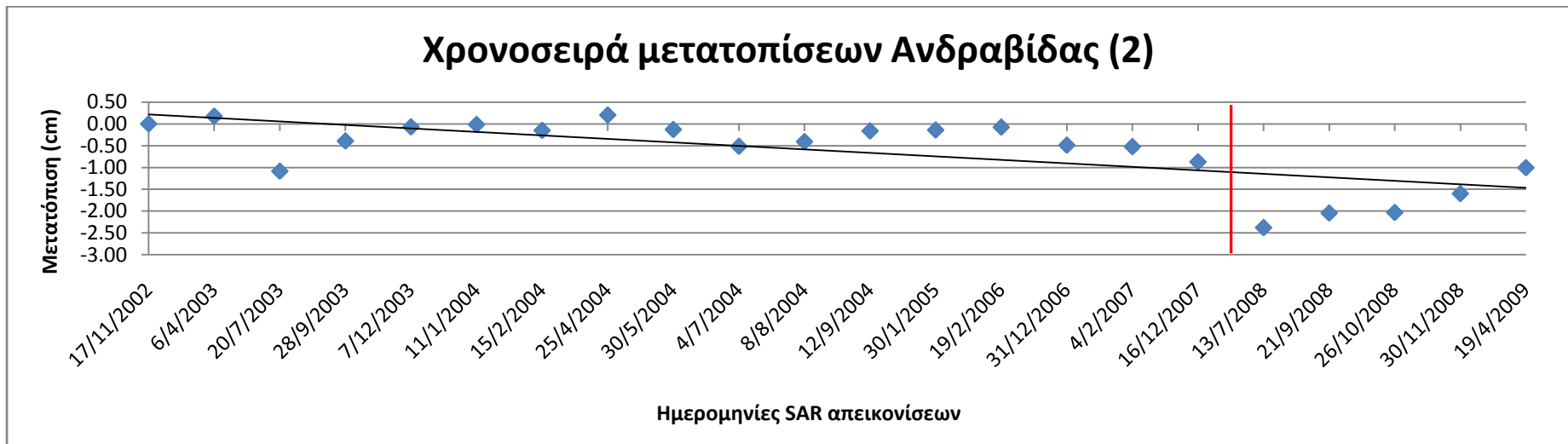
Ίδια ακριβώς εικόνα παρουσιάζει και το Διάγραμμα 2, όπου απεικονίζει την χρονοσειρά μετατοπίσεων για μια διαφορετική περιοχή εντός της λεκάνης της Ανδραβίδας (νοτίως της πόλης της Ανδραβίδας). Η διαχρονική εξέλιξη της μετατόπισης χαρακτηρίζεται ήπια, χωρίς μεγάλες μεταβολές, με συνολική αρνητική μετατόπιση. Ωστόσο, την ίδια ημερομηνία με προηγουμένως παρουσιάζεται μια απότομη μεταβολή στην μετατόπιση, με παράλληλη καταγραφή μεγάλων μετατοπίσεων για όλο το 2008.

Αυτή η μεγάλη και απότομη μεταβολή που καταγράφηκε και στις δύο περιοχές αποδίδεται στην επίδραση του σεισμού που σημειώθηκε στις 8/6/2008 ανατολικά της Ανδραβίδας, μεγέθους $M_w=6.4$. Παρά το γεγονός ότι το επίκεντρο του σεισμού βρίσκεται αρκετά μακριά από τις δύο περιοχές (περίπου 20 Km), η ένταση του ήταν αρκετή για να προκαλέσει μεταβολή στην εξέλιξη της παραμόρφωσης της περιοχής. Επίσης, στην απότομη μεταβολή συνέβαλε και το γεγονός ότι η λεκάνη αποτελείται από ολοκαινικά αλλούβια ιζήματα, τα οποία επηρεάζονται περισσότερο από τις σεισμικές δονήσεις, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη εδαφική επιτάχυνση.

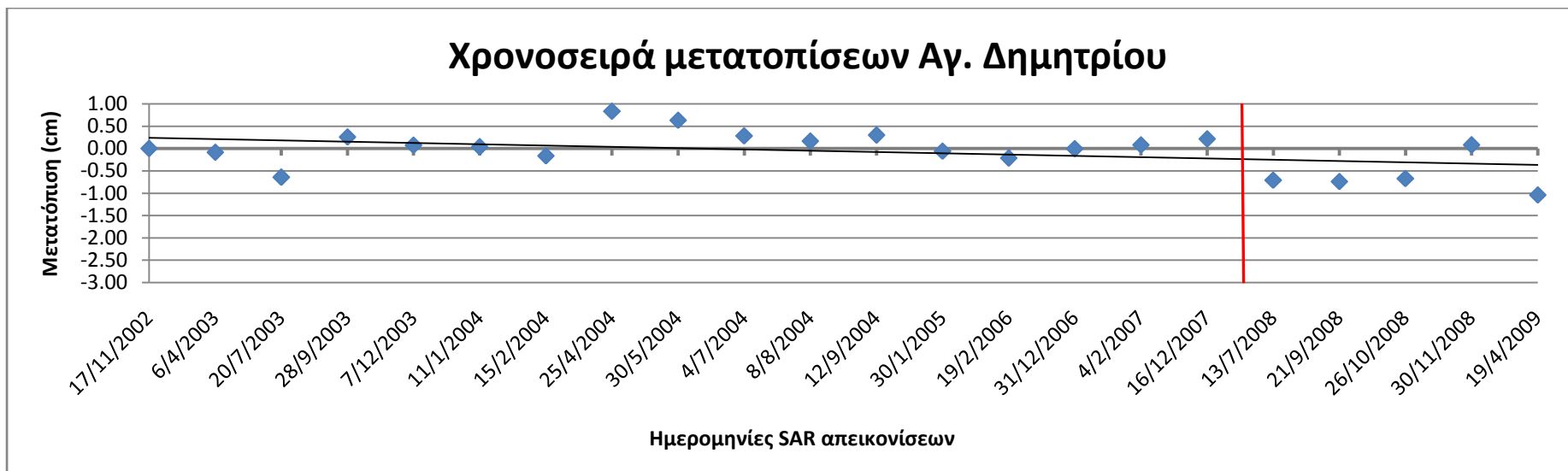
Αντίστοιχη εικόνα καταγράφεται και στην ευρύτερη περιοχή του οικισμού του Αγίου Δημητρίου. Στο Διάγραμμα 3 παρατηρείται μια ομαλή διαχρονική αρνητική μετατόπιση της περιοχής, η οποία όμως μεταβάλλεται απότομα στις 13/07/2008, όπως και προηγουμένως. Η μεταβολή βέβαια είναι μικρότερη από τις δύο προηγούμενες περιοχές, το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι το υπόβαθρο του οικισμού αποτελείται από συμπαγή τεταρτογενείς ιζήματα και πιο συγκεκριμένα κροκαλοπαγή. Το γεγονός ότι πρόκειται για συμπαγή ιζήματα σημαίνει ότι συμπεριφέρονται καλύτερα από τα αλλούβια, μετριάζοντας μερικώς την ένταση της δόνησης, σε συνδυασμό με την απόσταση από το επίκεντρο.



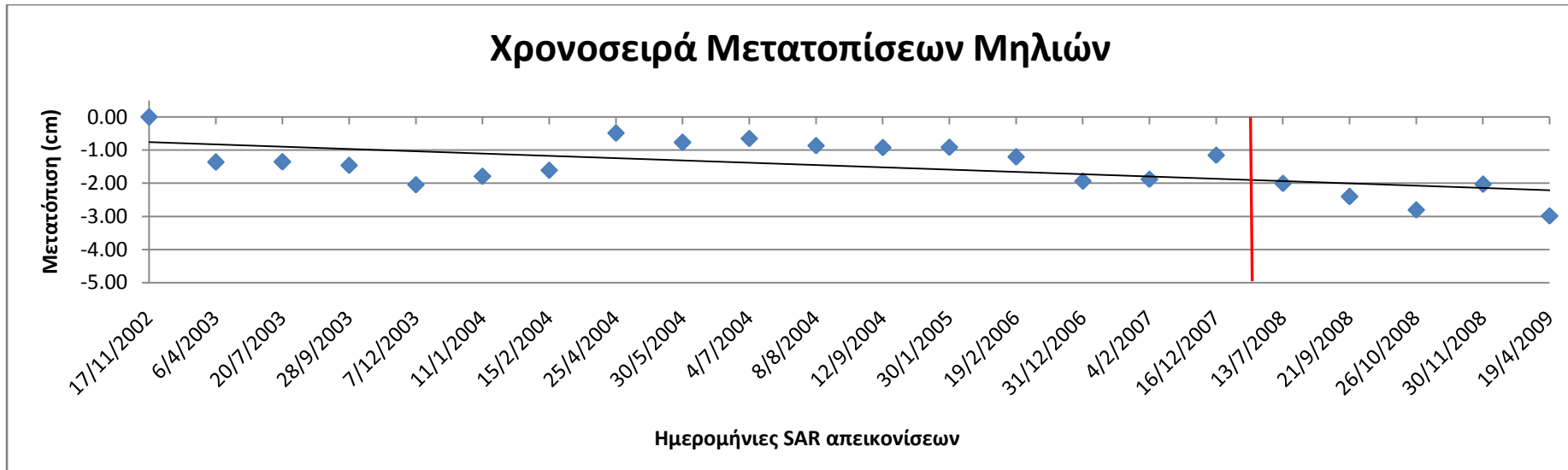
Διάγραμμα 6.1: Χρονοσειρά μετατοπίσεων ανατολικής Ανδραβίδας



Διάγραμμα 6.2: Χρονοσειρά μετατοπίσεων κεντρικής Ανδραβίδας



Διάγραμμα 6.3: Χρονοσειρά μετατοπίσεων Αγίου Δημητρίου



Διάγραμμα 6.4: Χρονοσειρά μετατοπίσεων οικισμού Μηλιών

Για την μελέτη της επίδρασης των πυρκαγιών, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση χρονοσειρών σε περιοχές εντός των καμένων εκτάσεων. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν περιοχές πλησίον των οικισμών Μηλιών, Ωλένης, Λάλα, Αλίφειρας και Ροδινών. Ο λόγος που επιλέχθηκαν οι παραπάνω περιοχές είναι ότι περιέχουν επαρκή αριθμών σημείων για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Για κάθε περιοχή υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών, όπως και προηγουμένως.

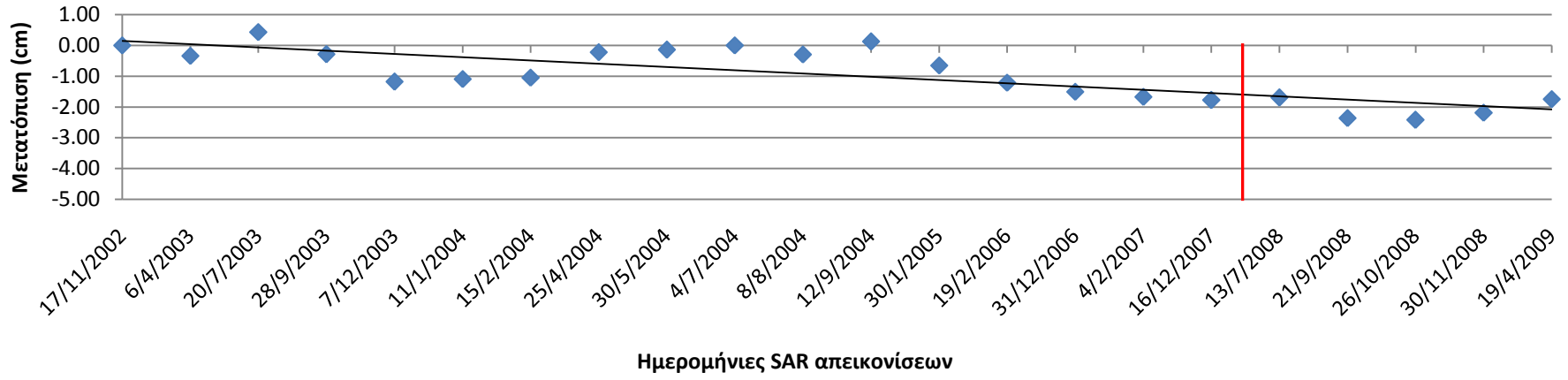
Αναφορικά με τη χρονοσειρά των Μηλιών (Διάγραμμα 6.4) παρατηρείται μια περιοδικότητα στις μετρήσεις της μετατόπισης, με διαχρονικά αρνητικό πρόσημο όμως. Ωστόσο, στην μετάβαση από την τελευταία μέτρηση του 2007, στην πρώτη του 2008, διακρίνεται μια ανωμαλία. Παρατηρείται μεγαλύτερη αρνητική μετατόπιση από την αναμενόμενη, προκαλώντας απότομη μεταβολή στην χρονοσειρά. Ταυτόχρονα, για όλες τις μετρήσεις του 2008 καταγράφονται οι μεγαλύτερες αρνητικές μετατοπίσεις της χρονοσειράς. Ενώ πριν το 2007 το εύρος των τιμών ήταν από -0.07 έως -2.1 cm, το 2008 καταγράφεται η μέγιστη αρνητική μετατόπιση (~ -2 cm) στις 26/10/2008.

Σχεδόν παρόμοια εικόνα εμφανίζει και η χρονοσειρά της περιοχής γύρω από τον οικισμό της Ωλένης. Εξίσου, εμφανίζεται μια διακύμανση στις τιμές μετατόπισης, ωστόσο μετά το 2005 παρατηρείται μια σαφής πτώση των τιμών με ήπιο ρυθμό (μέγιστη αρνητική μετατόπιση ίση με -1.8 cm). Όμως στις 13/07/2008 διακρίνεται μεγαλύτερη πτώση των τιμών, με ταυτόχρονη καταγραφή των μεγαλύτερων αρνητικών μετατοπίσεων εντός του 2008 (έως - 2.6 cm).

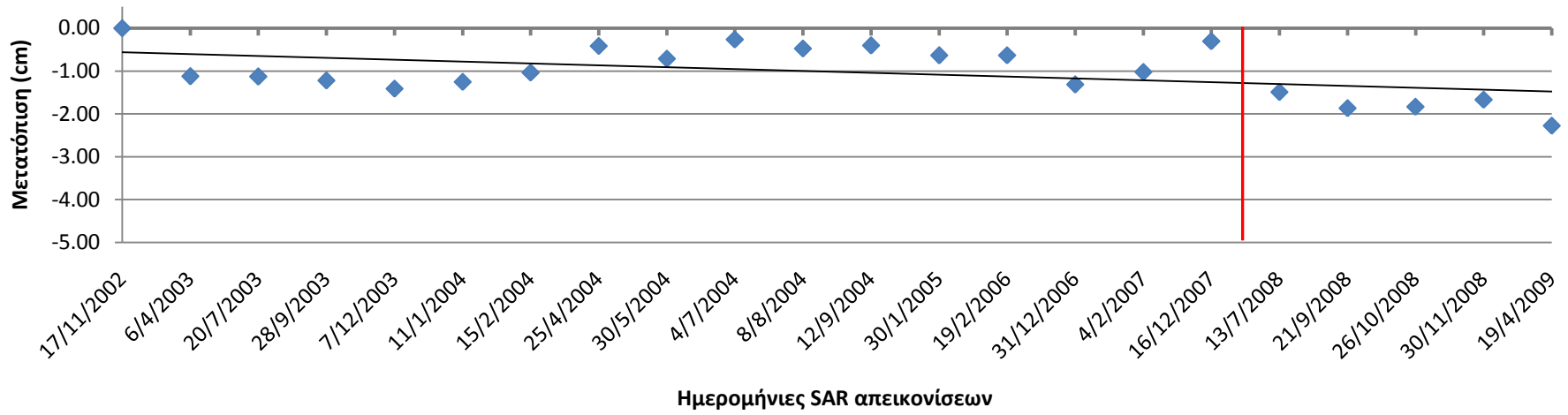
Αντίστοιχα, η περιοχή του πλησίον του οικισμού Λάλα παρουσιάζει μικρή διακύμανση στις τιμές μετατόπισης, η οποία διαφοροποιείται στην πρώτη καταγραφή του 2008. Διακρίνονται δύο περίοδοι με μέτρια και μικρή μετατόπιση, αντίστοιχα. Η πρώτη είναι από τις αρχές του 2003 έως τις αρχές του 2004 και η δεύτερη από τα μέσα του 2004 έως τις αρχές του 206. Το εύρος των τιμών πριν το 2008 είναι μεταξύ 0.01 και 1.7 mm, ενώ στην διάρκεια του 2008 καταγράφονται οι μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης (~ -2 mm).

Συγκριτικά μεταξύ των τριών παραπάνω περιοχών η περιοχή γύρω από τον Λάλα παρουσιάζει την μικρότερη μετατόπιση, ενώ οι περιοχές των οικισμών Μηλιές και Ωλένης εμφανίζουν μεγαλύτερη μετατόπιση και μεγαλύτερες ακραίες τιμές κατά την διάρκεια του 2008. Η κύρια διαφορά των παραπάνω οικισμών είναι ότι ο οικισμός του Λάλα βρίσκεται σε συμπαγή τεταρτογενή ιζήματα (κροκαλοπαγή του Λάλα), ενώ οι δύο άλλοι οικισμοί σε μη συνεκτικά τεταρτογενή ιζήματα (εναλλαγές άμμων, αργίλων, ψαμμιτών). Όσον αφορά την τοπογραφική κλίση που επικρατεί στις παραπάνω περιοχές δεν παρατηρείται μεγάλη διαφοροποίηση, καθώς στην περιοχή του Λάλα είναι πολύ μικρή (~3°), ενώ στις άλλες δύο περιοχές είναι μικρή (~ 10°).

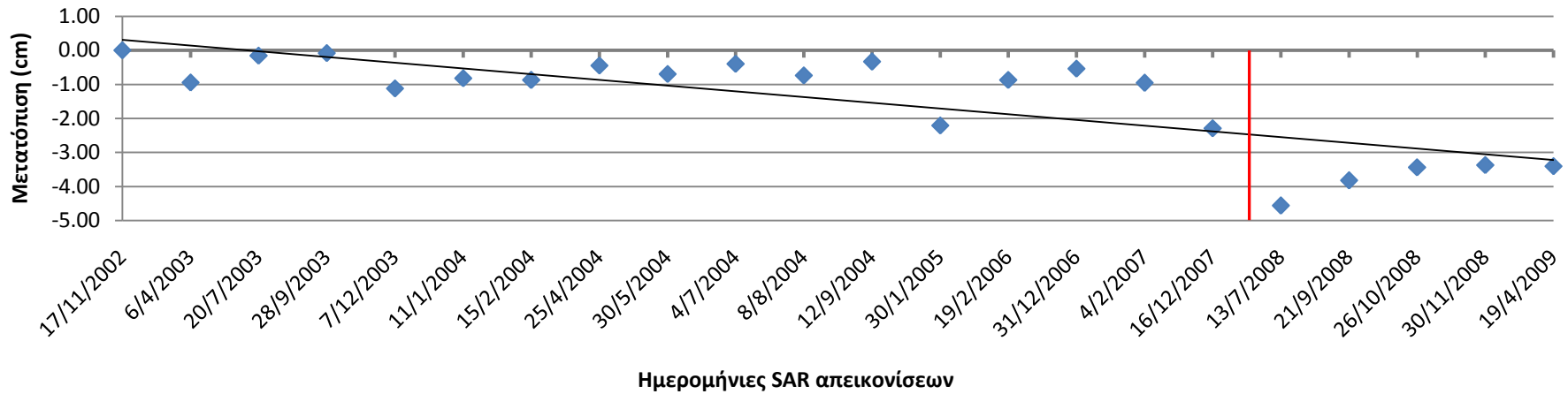
Χρονοσειρά Μετατοπίσεων Ωλένης



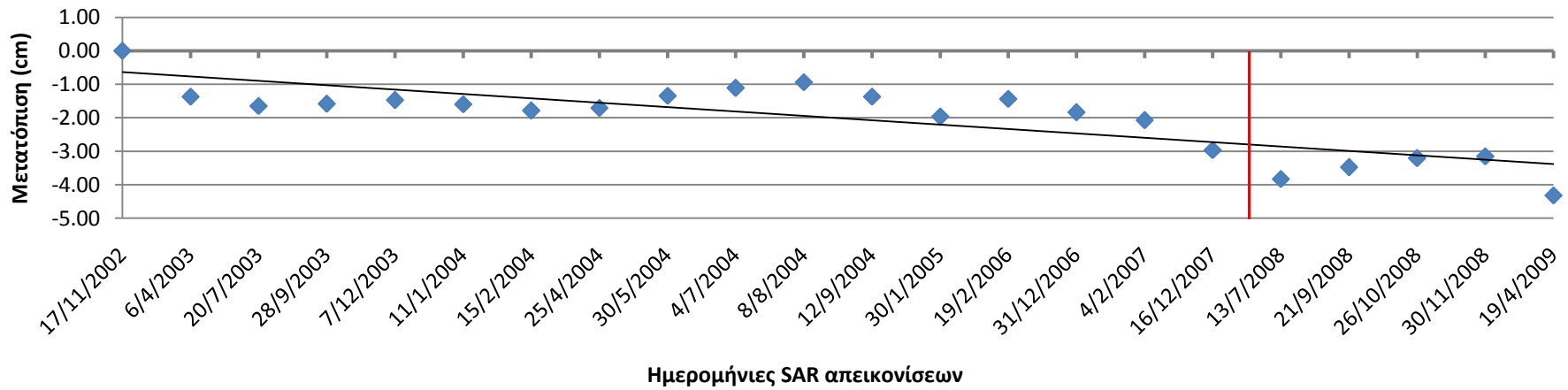
Χρονοσειρά Μετατοπίσεων Λάλα



Χρονοσειρά Μετατοπίσεων Ροδινών



Χρονοσειρά Μετατοπίσεων Αλιφείρας



Αντίστοιχα με τις παραπάνω περιοχές, επιλέχθηκαν δύο ακόμη στην νότια καμένη έκταση του νομού, όπου πραγματοποιήθηκε η ανάλυση χρονοσειρών των οικισμών Αλίφειρα και Ροδινών. Η επιλογή τους έγινε βάσει των ίδιων κριτηρίων με προηγουμένως (επαρκής αριθμός σημείων), όπου και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών μετατόπισης για κάθε χρονιά.

Στο Διάγραμμα 7 απεικονίζεται η διαχρονική εξέλιξη της μετατόπισης για την περιοχή πλησίον της Αλίφειρας. Αρχικά παρατηρείται ότι η γενική εικόνα της μετατόπισης είναι αρνητική με μικρή διακύμανση των τιμών. Μέχρι το 2007 οι τιμές είναι κάθε χρόνο σταθερές και κυμαίνονται από -1 έως -2 cm. Αντίθετα όμως στις 13/07/2008 παρουσιάζει μια απότομη πτώση, ενώ παράλληλα στις καταγραφές του 200 σημειώνονται οι μέγιστες αρνητικές μετατοπίσεις, αγγίζοντας τα -4 cm. Γενικά παρατηρείται ότι η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται γενικότερα από μεγαλύτερες μετατοπίσεις συγκριτικά με τις προηγούμενες περιοχές, οπότε αναμενόμενο ήταν να παρουσιάσει και τόσο μεγάλες μέγιστες τιμές.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περιοχή των Ροδινών, όπου η χρονοσειρά των μετατοπίσεων απεικονίζεται στο Διάγραμμα 8. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μια διαχρονικά αρνητική μετατόπιση λίγων χιλιοστών (έως -1 cm). Όμως είναι ιδιαίτερα χαρακτηριστική η καταγραφή του 2005, όπου παρουσιάζει μια απότομη πτώση με μετατόπιση ίση με -2.2 cm. Όμως αντίστοιχα μεγάλη πτώση καταγράφεται και στις τιμές μετά το 2008, όπου σημειώνονται και οι μέγιστες τιμές της χρονοσειράς. Η πτώση παρατηρείται τον τελευταίο μήνα του 2007 και συνεχίζει για όλο το 2008. Αυτή η μεγάλη πτώση αποδίδεται στην επίδραση της πυρκαγιάς με την καταστροφή της βλάστησης και την εντατικοποίηση του φαινομένου. Η πρώτη μεγάλη μεταβολή (2005) αποδίδεται στις υψηλές βροχοπτώσεις που σημειώθηκαν την χρονιά εκείνη.

Συγκρίνοντας τις δύο αυτές περιοχές με τις προηγούμενες της βόρειας καμένης έκτασης φαίνεται ότι οι πρώτες παρουσιάζουν μεγαλύτερη μετατόπιση για όλα τα έτη. Αυτή η διαφορά μπορεί να εξηγηθεί στο διαφορετικό γεωλογικό υπόβαθρο που δομεί τις δύο αυτές περιοχές. Η περιοχή της Αλίφειρας (που παρουσιάζει και την μεγαλύτερη μετατόπιση απ' όλες τις περιοχές) αποτελείται από φλύσχη της Ενότητας της Πίνδου, ενώ ο οικισμός των Ροδινών βρίσκεται πάνω στην κερατολιθική σειρά της Πίνδου.

Στατιστική Ανάλυση

Ολοκληρώνοντας, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί η στατιστική ανάλυση αυτών για την εξαγωγή των γενικών συμπερασμάτων. Αρχικά υπολογίστηκε η κατανομή των τιμών μετατόπισης ανά κατηγορία ταχύτητας και στην συνέχεια εξετάστηκε η διαφοροποίηση των ταχυτήτων των μετατοπίσεων, βάσει του γεωλογικού υποβάθρου. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, επιλέχθηκαν όλα τα σημεία εντός της περιοχής μελέτης με αρνητική ταχύτητα μετατόπισης (ταχύτητα < 0,7 mm / έτος) και στη συνέχεια υπολογίστηκε η κατανομή των σημείων βάσει του γεωλογικών σχηματισμών.

Πίνακας 6.1: Ποσοστό σημείων ανά κατηγορία ταχύτητας μετατόπισης

Ταχύτητα μετατόπισης (mm/ έτος)	Ποσοστό (%)
-8.13 - -3.35	2.8
-3.35 - -1.62	14.6
-1.62 - -0.7	29.5
-0.7 - 0.7	44.7
0.7 – 2.0	6.5
0.7 - 4.2	1.9

Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, η πλειονότητα των σημείων με αρνητική μετατόπιση βρίσκεται σε περιοχές που δομούνται από σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις, παρά το γεγονός ότι καταλαμβάνουν το 22,8%. Στην συνέχεια ακολουθούν οι χαλαρές τεταρτογενείς αποθέσεις, με ποσοστό 23,4% των σημείων, καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο Φλύσχος της Πίνδου που βρίσκεται στη τρίτη θέση 16,3%, ενώ καταλαμβάνει μόλις το 2.28% του νομού.

Πίνακας 6.2: Ποσοστό σημείων αρνητικής μετατόπισης ανά γεωλογικό σχηματισμό.

Γεωλογικός Σχηματισμός	Ποσοστό Έκτασης (%)	Ποσοστό Σημείων αρνητικής μετατόπισης (%)
Αλλουβιακές ολοκαινικές αποθέσεις	22.89	38.5
Τεταρτογενή ιζήματα	57.75	37.0
Φλύσχος Ιονίου	0.002	0.0
Ασβεστόλιθοι Ιονίου	0.04	0.0
Γύψος	0.01	0.0
Φλύσχος Πίνδου	2.28	16.3
Μεταβατικά στρώματα Πίνδου	1.39	2.1
Ασβεστόλιθοι Πίνδου	9.01	0.4
Κερατολιθική σειρά Πίνδου	1.92	1.9
Τεκτονο-ιζηματογενές σύμπλεγμα	0.01	0.06
Φλύσχος Γαβρόβου - Τριπόλεως	2.00	3.7
Ασβεστόλιθοι Γαβρόβου - Τριπόλεως	2.68	0.1

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι 95% περίπου των αρνητικών μετατοπίσεων εντοπίζεται σε τρεις κατηγορίες σχηματισμών, εκ των οποίων οι δύο είναι μεταλλικής ηλικίας. Αρνητική μετατόπιση καταγράφεται κυρίως στις αλλουβιακές αποθέσεις με ποσοστό 38.5%, ενώ αυτές καταλαμβάνουν το 23% της έκτασης του νομού. Επίσης, 37% των σημείων αρνητικής μετατόπισης καταγράφεται στα τεταρτογενή ιζήματα, ενώ καλύπτουν το 60% περίπου της περιοχής. Η Τρίτη κατηγορία σχηματισμών αντιστοιχεί στον Φλύσχο (Τριπόλεως και Πίνδου) με ποσοστό 20%.

Παρά το γεγονός ότι ο Φλύσχος Τριπόλεως και ο Φλύσχος Πίνδου έχουν την ίδια περίπου έκταση (2% και 2.28%, αντίστοιχα), στον δεύτερο καταγράφονται περισσότερα σημεία με αρνητική μετατόπιση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο Φλύσχος Πίνδου έχει υποστεί μεγαλύτερη παραμόρφωση που αποτυπώνεται από τις πολλές πτυχές και εφιπτεύσεις. Τέλος, στο υπόλοιπο αλπικό γεωλογικό υπόβαθρο καταγράφεται πολύ μικρό ποσοστό σημείων με αρνητική μετατόπιση, γεγονός που υποδεικνύει ότι δεν είναι επιρρεπές στις κατολισθήσεις. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό υπάρχει σαφής συσχέτιση της λιθολογίας με την παραμόρφωση. Το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στην εκδήλωση και εξέλιξη των κατολισθητικών φαινομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια να εντοπιστούν κατολισθητικά φαινόμενα, αξιοποιώντας την μέθοδο της διαφορικής συμβολομετρίας. Η διαφορική συμβολομετρία εφαρμόζεται συστηματικά τις τελευταίες δεκαετίες στην μελέτη των κατολισθήσεων, με μεγάλη επιτυχία (Simons and Rosen, 2015, Sun et al, 2015, Wasowski & Bovenga, 2014). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί οι μέθοδοι της Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας για την μελέτη των κατολισθητικών φαινομένων, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την ποιότητα των αποτελεσμάτων (Hooper, 2008, Guzzetti et al. 2009, Calo et al., 2014, Yanan et al., 2016)

Για τον εντοπισμό των κατολισθητικών φαινομένων στον Νομό Ηλείας εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές τεχνικές πολλαπλής διαχρονικής συμβολομετρίας, η τεχνική της Σώρευσης Συμβολογραφημάτων (Interferogram Stacking) και η τεχνική του Μικρού Ανύσματος Βάσης (Small Baseline Subset). Για την εκπόνηση της εργασίας έγινε χρήση της διαδικτυακής πλατφόρμας G-POD (Grid Processing on Demand) της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (European Space Agency – ESA), χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες υπηρεσίες.

Για την εφαρμογή των τεχνικών Σώρευσης και Μικρού Ανύσματος Βάσης χρησιμοποιήθηκαν οι υπηρεσίες GAMMA DInSAR και SBAS, αντίστοιχα. Προκύπτει ότι οι δύο υπηρεσίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες, καθώς αποτελούνται από απλοποιημένες διαδικασίες, όπου τις καθιστούν εύχρηστες από ερευνητές με βασικές γνώσεις συμβολομετρίας. Επιπλέον χάριν της μεγάλης υπολογιστικής δυνατότητας των συστημάτων, εξάγουν τα αποτελέσματα σε σύντομο χρονικό διάστημα, απαλλάσσοντας τον χρήστη από την κατοχή ισχυρών υπολογιστικών μονάδων (H/Y).

Ένα βασικό μειονέκτημα των υπηρεσιών της ESA είναι το γεγονός ότι ο χρήστης δεν μπορεί να δει και να αξιολογήσει τα ενδιάμεσα αποτελέσματα που προκύπτουν. Η επόπτευση των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων βοηθά στην ερμηνεία των τελικών αποτελεσμάτων κάθε εφαρμογής. Ταυτόχρονα, σε περιπτώσεις αποτυχίας ολοκλήρωσης της διαδικασίας, ο χρήστης δεν μπορεί να εντοπίσει που οφείλεται η αποτυχία και απαιτείται η επικοινωνία με την ομάδα υποστήριξης.

Η υπηρεσία GAMMA DInSAR είναι πολύ καλά δομημένη, δίνοντας την δυνατότητα διαφοροποίησης πολλών παραμέτρων από το χρήστη, βάσει των αναγκών του. Ωστόσο, η συγκεκριμένη υπηρεσία παρουσίασε αρκετά προβλήματα καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τα προβλήματα αφορούσαν κυρίως λάθη στον κώδικα προγραμματισμού της υπηρεσίας, τα οποία δεν ήταν δυνατό να διορθωθούν στο χρονικό διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής.

Εξαιτίας της αδυναμίας δημιουργίας κατάλληλων διαφορικών συμβολογραφημάτων μέσω της υπηρεσίας GAMMA DInSAR δεν κατέστη δυνατή η εφαρμογή της τεχνικής της Σώρευσης (Stacking). Όμως, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα, καθώς έγινε κατανοητός ο βαθμός δυσκολίας εφαρμογής της διαφορικής συμβολομετρίας και της δημιουργίας διαφορικών συμβολογραφημάτων.

Στην άλλη περίπτωση όμως, η υπηρεσία SBAS της ίδιας πλατφόρμας λειτούργησε επιτυχώς, παράγοντας ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα, βάσει των οποίων εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τα κατολισθητικά φαινόμενα στον νομό Ηλείας. Εντοπίστηκαν πολλές περιοχές που εμφανίζουν αρνητική μετατόπιση σε σχέση με το σημείο αναφοράς που ορίστηκε στο αλπικό υπόβαθρο. Επίσης, συνέβαλε θετικά στην κατανόηση της συμπεριφοράς των μετατοπίσεων, χάριν της ανάλυσης των χρονοσειρών.

Όπως αποδείχθηκε, υπάρχει σαφής συσχέτιση των κατολισθητικών φαινομένων με το γεωλογικό υπόβαθρο. Η πλειονότητα των περιοχών όπου καταγράφεται αρνητική μετατόπιση δομείται από σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις, ενώ μεγάλο ποσοστό αρνητικών μετατοπίσεων καταγράφηκαν και τεταρτογενή ιζήματα. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι πολλά κατολισθητικά φαινόμενα εντοπίστηκαν σε περιοχές όπου επικρατεί ο φλύσχος, παρά την μικρή έκταση που καταλαμβάνει. Αντίθετα, στο αλπικό υπόβαθρο της περιοχής (εκτός του φλύσχη) δεν παρατηρείται αρνητική μετατόπιση.

Το παραπάνω είναι σύμφωνο και με τη βιβλιογραφία, καθώς όπως αναφέρουν οι Farina et al (2006) και οι Guzzetti et al (2009) στους αλλουβιακούς σχηματισμούς παρατηρούνται περισσότερα σημεία με καθίζηση, αλλά και με μεγαλύτερη ταχύτητα. Αντίθετα, σε πιο συμπαγείς σχηματισμούς οι ταχύτητες είναι αισθητά μικρότερες. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι περιπτώσεις όπου, ενώ η συνολική παραμόρφωση ήταν αρνητική, για κάποιες περιόδους καταγράφονταν θετική μετατόπιση.

Οι Meisina et al (2008) και οι Wasowski and Bovenga (2014) αναφέρουν ότι σχηματισμοί πλούσιοι σε άργιλο ή αργιλικά υλικά παρουσιάζουν έντονη διαφοροποίηση στην ταχύτητα παραμόρφωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι σχηματισμοί αυτοί είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στην μεταβολή του περιεχόμενου ύδατος, αυξομειώνοντας τον όγκο τους.

Ωστόσο, παρά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου SBAS παρουσιάστηκαν ορισμένοι περιορισμοί, οι οποίοι σχετίζονται όμως με τα χαρακτηριστικά του νομού. Αρχικά, ο ορισμός του σημείου αναφοράς αποδείχθηκε επίπονη διαδικασία, καθώς η επιλογή του πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις, όπως υψηλή συνάφεια, σταθερό σημείο χωρίς παραμόρφωση, χαμηλό υψόμετρο.

Τα χαρακτηριστικά του Νομού Ηλείας είναι τέτοια, όπου τα διαθέσιμα σημεία τα σημεία που πληρούν τις παραπάνω συνθήκες είναι πολύ περιορισμένα. Οι αστικές περιοχές (με υψηλή συνάφεια) του νομού παρουσιάζουν ελαφρά παραμόρφωση, οπότε και αποκλείονται. Επίσης αποκλείονται οι οικισμοί και περιοχές εντός των καμένων εκτάσεων, λόγω της μεταβολής του σήματος. Οι μόνες διαθέσιμες επιλογές ήταν το αλπικό υπόβαθρο που θεωρείται σταθερό και με υψηλή συνάφεια, αλλά βρίσκεται όρια του νομού, είτε ανατολικά, είτε νότια. Η απόσταση όμως από το κέντρο της περιοχής μελέτης επιδρά αρνητικά στην ακρίβεια των μετρήσεων της παραμόρφωσης (Casu et al., 2006).

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι πολλές περιοχές του νομού χαρακτηρίζονταν από χαμηλή συνάφεια, γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα την αδυναμία μέτρησης της παραμόρφωσης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι ο νομός χαρακτηρίζεται από πλούσια βλάστηση. Όπως καταγράφεται και σε αντίστοιχες μελέτες, περιοχές όπου επικρατεί υψηλή φυτοκάλυψη παρουσιάζουν έντονη αποσυσχέτιση του σήματος. Όπως αναφέρουν οι Farina et al. (2006) και οι Guzzetti et al. (2009), στις περιοχές με έντονη βλάστηση δεν είναι εφικτή η εκτίμηση της μετατόπισης εξαιτίας της χαμηλής συνάφειας. Αντίστοιχα προβλήματα αναφέρουν και οι Neamah et al. (2014), όπου εφαρμόζουν την διαφορική συμβολομετρία σε τροπικά δάση με έντονη φυτοκάλυψη.

Από το παραπάνω αποδείχθηκε ότι η μέθοδος της συμβολομετρίας παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς ως προς τον εντοπισμό κατολισθητικών φαινομένων μετά την επίδραση των πυρκαγιών. Ενώ αναμένεται να ενταθούν τα φαινόμενα κατολίσθησης στις πυρόπληκτες περιοχές, αυτά δεν μπορούν να εντοπιστούν πλήρως με την συγκεκριμένη τεχνική. Ο λόγος είναι ότι η πυρκαγιά καταστρέφει την βλάστηση, προκαλώντας μεγάλη μεταβολή στην επιφάνεια παρατήρησης, η οποία οδηγεί σε πλήρη αποσυσχέτιση του σήματος. Γενικά οι περιοχές με πλούσια βλάστηση παρουσιάζουν μικρή συνάφεια εξαιτίας των εποχιακών μεταβολών της βλάστησης, αλλά η συνάφεια χάνεται πλήρως μετά από μια πυρκαγιά.

Οι τεχνικές της Πολλαπλής Διαχρονικής Συμβολομετρίας βασίζονται στην διατήρηση υψηλής συνάφειας σημείων εντός της περιοχής. Όταν η συνάφεια χάνεται (εξαιτίας πυρκαγιών) οι τεχνικές δεν εφαρμόζονται με επιτυχία. Γι' αυτόν τον λόγο ήταν δύσκολη η εξαγωγή αποτελεσμάτων της τεχνικής SBAS στην νότια Ηλεία. Γενικά παρατηρείται ότι εντός των καμένων εκτάσεων η πυκνότητα των σημείων μέτρησης της μετατόπισης είναι πολύ μικρή, συγκριτικά με τις υπόλοιπες, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις απουσιάζουν τελείως.

Επιπλέον ένας ακόμη παράγοντας που συνετέλεσε αρνητικά στην εφαρμογή της μεθόδου SBAS ήταν το έντονο ανάγλυφο του νομού. Το έντονο ανάγλυφο δεν ευνοεί τον εντοπισμό πολλών σημείων λόγω γεωμετρίας λήψης του δορυφόρου. Όπως διαπιστώθηκε στις πεδινές εκτάσεις και σε περιοχές με ήπιο ανάγλυφο ο αριθμός των σημείων όπου υπολογίστηκε η μετατόπιση ήταν πολύ μεγάλος. Αντίθετα, περιοχές με έντονες κλίσεις και απότομο ανάγλυφο παρουσίασαν φαινόμενα γεωμετρικής παραμόρφωσης (σμίκρυνση, αντιστροφή, σκίαση), γεγονός που οδήγησε στον αποκλεισμό τους από τον υπολογισμό.

Πολλές εργασίες που έχουν γίνει στην οροσειρά των Απέννινων (έντονο ανάγλυφο) για τον εντοπισμό κατολισθήσεων με την εφαρμογή μεθόδων διαφορικής συμβολομετρίας (Meisina et al. 2008, Guzzetti et al. 2009, Cascini et al. 2010, Wasowski & Bovenga 2014, Rocca et al., 2015) και στο σύνολό τους αναφέρουν τους περιορισμούς εξαιτίας του έντονου ανάγλυφου. Αντίστοιχα και σε άλλες περιοχές με έντονο ανάγλυφο παρατηρούνται προβλήματα λόγω γεωμετρικών παραμορφώσεων. Οι Vöge et al. (2015) αναφέρουν ότι αντιμετώπισαν πολλές δυσκολίες στην χαρτογράφηση κατολισθήσεων στα Ινδικά Ιμαλάια, λόγω έντονου ανάγλυφου. Η μόνη λύση είναι η χρήση δεδομένων ανοδικής και καθοδικής τροχιάς, χωρίς ωστόσο εγγυημένα αποτελέσματα.

Επίσης, καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχία της τεχνικής διαδραματίζει και η κλίμακα παρατήρησης του φαινομένου. Η κλίμακα που επιλέχθηκε ήταν αρκετά μεγάλη (100x100 Km), προκειμένου να καλυφθεί το σύνολο του νομού. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της περιφερειακής κλίμακας, όπως αναφέρουν οι Wasowski and Bovenga (2014), είναι ότι αυξάνεται ο αριθμός των σημείων με υψηλή συνάφεια.

Οι περιφερειακής κλίμακας περιοχές χαρακτηρίζονται και από μεγάλη ποικιλομορφία στην βλάστηση, αλλά και από μεγάλη διαφοροποίηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών εντός της περιοχής, παράγοντες που μειώνουν την συνάφεια. Γι' αυτό τον λόγο επιλέγονται μεσαίας κλίμακας περιοχές μελέτης επιλέγονται συνήθως για τον περιορισμό του παραπάνω προβλήματος (Cascini et al, 2010), αλλά με κίνδυνο τον περιορισμό των σημείων με διαχρονική υψηλή συνάφεια.

Αν και πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές σε μεσαία κλίμακα (περιοχή μελέτης 30x30 Km), καμία δεν κατάφερε να ολοκληρωθεί με επιτυχία, καθώς εντός της περιοχής δεν υπήρχε επαρκής αριθμός σημείων με υψηλή συνάφεια, γεγονός που καθιστούσε αδύνατη την ολοκλήρωση του αλγορίθμου.

Συμπερασματικά, ως προς την αξιολόγηση των τεχνικών της Διαφορικής Συμβολομετρίας, αυτή παρουσίασε διάφορες δυσκολίες και περιορισμούς. Αρχικά, ο μεγαλύτερος περιορισμός ήταν η χαμηλή συνάφεια που παρατηρήθηκε, η οποία ήταν αποτέλεσμα της έντονης βλάστησης και της μεγάλης μεταβολής αυτής εξαιτίας των πυρκαγιών. Ακόμη εξαιτίας του έντονου ανάγλυφου της περιοχής μελέτης, δημιουργήθηκαν προβλήματα γεωμετρικής παραμόρφωσης. Το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής συνετέλεσε στην αδυναμία επιλογής κατάλληλου σημείου αναφοράς, που αποτελεί καθοριστικό παράγοντα, της διαφορικής συμβολομετρίας.

Ωστόσο, η εφαρμογή της παραπάνω τεχνικής χαρακτηρίζεται από ορισμένα πλεονεκτήματα, τα οποία υπερτερούν των μειονεκτημάτων που αναφέρθηκαν. Αρχικά, μέσω της μεθόδου ήταν δυνατή η μελέτη όλης της έκτασης του νομού, γεγονός που θα ήταν αδύνατο με τις συμβατικές μεθόδους (χρονοβόρες). Επίσης, αποτελεί μια μέθοδο με πολύ χαμηλό κόστος, έναντι των υπολοίπων κοστοβόρων μεθόδων. Ταυτόχρονα, παρείχε μετρήσεις μετατόπισης πολύ μεγάλης ακρίβειας (της τάξης μερικών χιλιοστών), παρά τη μεγάλη έκταση της περιοχής. Παράλληλα δόθηκε η δυνατότητα κατανόησης των παραμορφωτικών κινήσεων, χάριν της μελέτης των χρονοσειρών που προσφέρει η μέθοδος. Οι μεταβολές στην διαχρονική μετατόπιση μπορούν να συσχετιστούν με άλλα φαινόμενα που πιθανόν συνετέλεσαν στις μεταβολές αυτές, όπως για παράδειγμα σεισμικά γεγονότα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως προέκυψε, στο Νομό Ηλείας εντοπίστηκαν πολλές περιοχές που εμφανίζουν αρνητική μετατόπιση ως προς το σημείο αναφοράς (που ορίστηκε στο αλπικό υπόβαθρο της περιοχής). Εξαιρέση αποτελεί το αλπικό υπόβαθρο που απαντάται εντός του νομού, καθώς και η πόλη του Πύργου. Το παραπάνω έρχεται να επιβεβαιώσει τα πολυάριθμα κατολισθητικά γεγονότα που έχουν καταγραφεί εντός του νομού. Οι κατολισθήσεις που έχουν καταγραφεί είναι είτε γρήγορες και βίαιες, είτε αργές (μικρής ταχύτητας). Οι πρώτες γίνονται άμεσα αντιληπτές, καθώς προκαλούν σοβαρά προβλήματα στις ανθρωπογενείς υποδομές (οικισμούς, οδικό δίκτυο), ενώ οι δεύτερες εντοπίζονται με το πέρασμα των χρόνων, με την σταδιακή αύξηση των ζημιών που προκαλούν στις κατασκευές.

Οι περιοχές με αρνητική μετατόπιση μπορούν να διακριθούν σε δύο κύριες ενότητες, βάσει των συνθηκών που επικρατούν σ' αυτές. Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει τις περιοχές που ανήκουν στην λεκάνη της Αμαλιάδας στο βόρειο τμήμα του νομού. Η λεκάνη αυτή χαρακτηρίζεται από μικρή μέση ταχύτητα αρνητικής μετατόπισης (-1.5 mm/έτος), αλλά και από μικρές μετατοπίσεις ανά έτος. Ο κύριος παράγοντας που συμβάλει στην μικρή μετατόπιση είναι το γεωλογικό υπόβαθρο της λεκάνης που αποτελείται εξ ολοκλήρου ολοκαινικές αλλουβιακές αποθέσεις. Οι αποθέσεις αυτές λόγω της πολύ μικρής συνοχής τους σταδιακά συμπιέζονται με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν φαινόμενα αρνητικής μετατόπισης.

Αναλύοντας τις χρονοσειρές των σημείων της παραπάνω περιοχής προέκυψε μια απότομη μεταβολή στην διαχρονική εξέλιξη της παραμόρφωσης, το έτος 2008. Όπως αποδείχθηκε η απότομη αύξηση των μετατοπίσεων που καταγράφηκε την περίοδο αυτή οφείλεται στην επίδραση του σεισμού της Ανδραβίδας, μεγέθους $M_w=6,4$ που συνέβη στις 08/06/2008. Παρόλο που το επίκεντρο είναι 20 χιλιόμετρα μακριά, εξαιτίας των του γεωλογικού υποβάθρου το μέγεθος του σεισμού ήταν αρκετό, ώστε να προκαλέσει μεταβολή στην χρονοσειρά των μετατοπίσεων.

Η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει τις περιοχές που βρίσκονται εντός των καμένων εκτάσεων των μεγάλων πυρκαγιών που έπληξαν τον νομό το καλοκαίρι του 2007. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από μεσαίες τιμές μετατόπισης (από -2 έως -5 mm/έτος) και η μετατόπιση είναι γενικά είναι σταθερή σε όλα τα έτη μέχρι το 2007. Στις χρονοσειρές των περιοχών αυτών παρατηρείται μια έντονη μεταβολή στις τιμές μετατόπισης (-2 mm) στην μετάβαση από το 2007 στο 2008. Η απότομη μεταβολή συνοδεύεται και από μεγάλες μέγιστες τιμές μετατόπισης, που δεν είχαν καταγραφεί τα προηγούμενα χρόνια.

Το παραπάνω αποδεικνύει ότι η επίδραση της πυρκαγιάς έχει αρνητικές επιπτώσεις στην εξέλιξη του φαινομένου των κατολισθήσεων. Η καταστροφή της βλάστησης συνεπάγεται αδυναμία συγκράτησης των απορρεόντων υδάτων, αλλά και του εδαφικού ορίζοντα. Μετά τις πυρκαγιές αυξάνονται τα φαινόμενα εδαφικής διάβρωσης, τα οποία καταγράφονται στις χρονοσειρές των μετατοπίσεων.

Επίσης, τόσο από την εξέταση των επιμέρους περιοχών, όσο και την εξέταση του συνόλου των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι υπάρχει σαφής διαφοροποίηση των τιμών μετατόπισης βάσει του γεωλογικού υποβάθρου. Όπως αποδείχθηκε η πλειονότητα των περιοχών με αρνητική μετατόπιση δομείται από σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις, ενώ μεγάλο ποσοστό αρνητικών μετατοπίσεων καταγράφηκαν και στα χαλαρά τεταρτογενή ιζήματα. Επίσης, πολλά κατολισθητικά φαινόμενα εντοπίστηκαν σε περιοχές με συμπαγή τεταρτογενή ιζήματα, αλλά και σε περιοχές όπου επικρατεί ο φλύσχος.

Ακόμη, εντοπίστηκε και διαφοροποίηση της πυκνότητας των σημείων βάσει των χρήσεων γης. Οι αστικές περιοχές, αλλά και οι οικισμοί χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα σημείων μέτρησης της παραμόρφωσης. Αντίθετα, περιοχές με φυτοκάλυψη, παρουσιάζουν μικρότερο αριθμό σημείων εντός της έκτασής τους. Όσο πιο πυκνή και πλούσια είναι βλάστηση, τόσο λιγότερα σημεία εντοπίζονται. Έτσι, εντός των γεωργικών εκτάσεων υπήρχε ικανοποιητικός αριθμός σημείων, αλλά σε περιοχές με φυσική βλάστηση η πυκνότητα των μετρήσεων ήταν πολύ μικρότερη.

Εν κατακλείδι, οι τεχνικές της Πολλαπλής Διαχρονικής Διαφορικής Συμβολομετρίας παρήγαγαν ικανοποιητικά αποτελέσματα παρά του όποιους περιορισμούς. Η εφαρμογή της μεθόδου SBAS συνέβαλε θετικά στην κατανόηση του καθεστώτος της παραμόρφωσης του Νομού Ηλείας, ενώ παράλληλα εντοπίστηκαν και προβληματικές περιοχές. Για να αξιοποιηθούν πλήρως όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η διαφορική συμβολομετρία στην μελέτη των κατολισθήσεων, προτείνονται ορισμένες παρεμβάσεις ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι περιορισμοί.

Απαραίτητη είναι η περαιτέρω βελτίωση των υφιστάμενων τεχνικών και ιδιαίτερα των υπηρεσιών της ESA, όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επίσης, προτείνεται η επιλογή μικρότερης κλίμακας παρατήρησης, όπου συνεπάγεται μικρότερη περιοχή μελέτης αναμένεται να εξαχθούν καλύτερα αποτελέσματα. Η βελτίωση της συνάφειας, που αποτελεί σημαντικό περιορισμό στο νομό Ηλείας, ενδέχεται να επιτευχθεί με την χρήση των νέων δορυφόρων (Sentinel 1), με μικρή περίοδο επαναληψιμότητας και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ταυτόχρονα, ο συνδυασμός των μετρήσεων της συμβολομετρίας με μετρήσεις GPS αναμένεται να βελτιώσει τα αποτελέσματα.

Η παρούσα μελέτη θα μπορούσε εξελιχθεί εφαρμόζοντας τις ίδιες τεχνικές συμβολομετρίας, αλλά με δεδομένα απεικονίσεων SAR διαφορετικού μήκους κύματος. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στο κανάλι C, το οποίο επηρεάζεται από την βλάστηση. Αντιθέτως, η χρήση δεδομένων καναλιού L αναμένεται να περιορίσει τα φαινόμενα αποσυσχέτισης εξαιτίας της βλάστησης, αναμένοντας τη βελτίωση της συμβολομετρικής συνάφειας.

Επίσης, σε περιοχές με φαινόμενα γεωμετρικής παραμόρφωσης μπορεί να εφαρμοστεί η επίγεια συμβολομετρία, με τη χρήση επίγειου ραντάρ. Η δυνατότητα τοποθέτησης του επίγειου ραντάρ ακριβώς στην περιοχή ενδιαφέροντος, εξαλείφει τα φαινόμενα σκίασης, σμίκρυνσης και αναστροφής, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί και προβλήματα λόγω ατμοσφαιρικής συμβολής και τροχιακών δεδομένων. Ταυτόχρονα, βελτιώνει την διαθεσιμότητα των δεδομένων, καθώς δεν εξαρτάται από την περίοδο επαναληψιμότητας του δορυφόρου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Δεληκαράογλου Δ. Γεωδαιτικές εφαρμογές συμβολομετρίας SAR: Ειδικά θέματα δορυφορικής γεωδαισίας. Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο – Τμήμα Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, 2012, Αθήνα.
- Καρτάλης, Κ. και Χ. Φείδας,. Αρχές και εφαρμογές της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Γκιούδας Εκδοτική, 2006, Αθήνα. ISBN: 960-387-520-1
- Μαριολάκος, Η. & Παπανικολάου, Δ., (1987). - Είδος παραμόρφωσης και σχέση παραμόρφωσης - σεισμικότητας στο Ελληνικό τόξο. Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Ετ., XIX, σ. 59-76.
- Μαριολάκος, Η. & Φουντούλης, Ι., (1991). - Νεοτεκτονικές μακροπτυχές στην περιοχή Φιλιατρών (Δυτ. Μεσσηνία, Πελοπόννησος). Πρακτικά 5ου Γεωλ. Επιστ. Συν. της Ελλ. Γεωλ. Ετ., Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Ετ., XXV/3, σ. 19-38.
- Μερτίκας Στέλιος. Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. Εκδόσεις ΙΩΝ, 1999, Αθήνα ISBN: 960-405-949-1
- Ρόζος Δ., Γεωργιάδης Π., Αλεξούλη – Λειβαδίτη Α., Κυρούσης Γ., Μαρίνος Π., Ροντογιάννη Θ., Τσιαμπάος Γ., Μαρκαντώνης Κ., Τσαγγαράτος Π., (2008). Εκτίμηση εδαφικής απώλειας των λεκανών απορροής του Δήμου Ζαχάρως-Νομού Ηλείας. Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών.
- Φουντούλης, Ι. (2000). Νεοτεκτονική εξέλιξη της Νοτιοδυτικής Πελοποννήσου, διδακτορική διατριβή, εκδόσεις «ΓΑΙΑ» Παν/μιο Αθηνών, Αθήνα.
- Φουντούλης, Ι., & Λέκκας, Ε., (1991). Η παρουσία της Ιονίου ενότητας στο όρος Λάπιθας (Κεντροδυτική Πελοπόννησος). 1η Γενική Επιστημονική Συνεδρία 1991 της Ελλ. Γεωλ. Ετ., Μάιος 1991, Ξάνθη.

Ξένη Βιβλιογραφία

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40 (11), 2375-2383.
- Bovenga, F., Nitti, D.O., Fornaro, G., Radicioni, F., Stoppini, A., Brigante, R. (2013) Using C/Xband SAR interferometry and GNSS measurements for the Assisi landslide analysis. International Journal of Remote Sensing 34 (11), 4083–4104.
- Bovenga, F., Wasowski, J., Nitti, D.O., Nutricato, R., Chiaradia, M.T. (2012). Using Cosmo/ SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslide analysis. Remote Sensing Environment 119, 272–285.

- Calò F., Ardizzone F., Castaldo R., Lollino P., Tizzani P., Guzzetti F., Lanari R., Angeli M., Pontoni F., Manunta M. (2014) Enhanced landslide investigations through advanced DInSAR techniques: The Ivancich case study, Assisi, Italy. *Remote Sensing of Environment* 142, 69-82
- Cascini, L., Fornaro, G., Peduto, D. (2009) Analysis at medium scale of low-resolution DInSAR data in slow-moving landslide affected areas. *ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing* 64 (6), 598–611.
- Cascini, L., Fornaro, G., Peduto, D. (2010) Advanced low- and full-resolution DInSAR map generation for slow-moving landslide analysis at different scales. *Engineering Geology* 112 (1–4), 29–42.
- Casu, F., Manzo, M., Lanari, R. (2006) A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Remote Sensing Environment* 102, 95–210.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. (2003a) SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing* 41 (7), 1685–1700.
- Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2003b) Monitoring landslides and tectonic motion with the permanent scatterers technique. *Engineering Geology* 68, 3–14.
- Colesanti, C., Wasowski, J., 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology* 88 (3–4), 173–199.
- Delacourt, C., Allemand, P., Berthier, E., Raucoules, D., Casson, B., Grandjean, P., Pambrun, C., Varel, E. (2007) Remote-sensing techniques for analyzing landslide kinematics: a review. *Bulletin of the Geological Society of France* 178 (2), 89–100.
- De Luca Claudio & Casu Francesco (2015) SBAS – InSAR service within the G-POD platform. User Manual. European Space Agency
- Depountis N., Lainas S., Pyrgakis D., Sabatakakis N., Koukis G. (2010) Engineering geological and geotechnical investigation of landslide events in wildfire affected areas of Ilia prefecture, Western Greece. *Bulletin of Geological Society* Proceeding of the 12th International Congress, Patra.
- Duro, J., Gaset, M., Koudogbo, F.N., Arnaud, A. (2012) Combination of X-band high resolution SAR data from different sensors to produce ground deformation maps. *Proceedings of Fringe 2011 Workshop*, September 19–23, 2011, Frascati, Italy. ESA
- Emardson T.R. Simons M. and Webb F.H. (2003) Neutral atmospheric delay in interferometric synthetic aperture radar applications: Statistical description and mitigation. *Journal of Geophysical Research* 108, (B5), 2231.
- European Space Agency. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, The Netherlands, 2007.

- Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F., Moretti, S., 2006. Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from ESA-SLAM project. *Engineering Geology* 88, 200–217.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A. (2011) A new algorithm for processing interferometric data-stacks: Squee SAR. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 49 (9), 3460–3470.
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., Prati, C., Rocca, F. (2007) Submillimeter accuracy of InSAR time series: experimental validation. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 45, 1142–1153.
- Ferretti, C. Prati, F. Rocca (2000) Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE TGARS* 38, 5.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. and Monti Guarnieri, A., 1997. Multibaseline SAR interferometry for automatic DEM reconstruction. 3rd ERS Workshop, Florence, Italy.
- Fornaro, G., Reale, D., Serafino, F. (2009) Four-dimensional SAR imaging for height estimation and monitoring of single and double scatterers. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 47 (1), 224–237.
- Guzzetti, F., Manunta, M., Ardizzone, F., Pepe, A., Cardinali, M., Zeni, G., Reichenbach, P., Lanari, R., 2009. Analysis of ground deformation detected using the SBAS-DInSAR technique in Umbria, Central Italy. *Pure Applied Geophysics* 166, 1425–1459.
- Hanssen, R. (2001) *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Hanssen, R. (2005) Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation* 6, 253–260.
- Hilley, G.E., Burgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F. (2004) Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science* 304, 1952–1955.
- Hooper, A., 2008. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters* 35, L16302.
- Koukouvelas I., Mpresiakas A., Sokos E., Doutsos T. (1996) The tectonic setting and ground hazards of the 1993 Pyrgos earthquake, Peloponnese, Greece. *Journal of the Geological Society* 153, 39-49

- Mason J., Reicherter K., Papanikolaou I. (2015) The Lapithas Mountain faults and nearby archeological damage, western Peloponnese, Greece. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 59, 4, 189-213
- Mavroulis S.D., Fountoulis G.I., Skourtsos E.N., Lekkas, E. L., Papanikolaou I.D. (2013) Seismic intensity assignments for the 2008 Andravida (NW Peloponnese, Greece) strike-slip event (June 8, Mw=6.4) based on the application of the Environmental Seismic Intensity scale (ESI 2007) and the European Macroseismic scale (EMS-98). Geological structure, active tectonics, earthquake environmental effects and damage pattern. *Annals of Geophysics* 56, 6
- Mora, O., Mallorqui, J.J., Broquetas, A., 2003. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 41, 2243–2253.
- Neamah M., Pradhan J. B., Tehrany M. S., (2014) Detection of vertical slope movement in highly vegetated tropical area of Gunung pass landslide, Malaysia, using L-band InSAR technique. *Geosciences Journal* 18:1, 61 – 68.
- Notti, D., Meisina, C., Zucca, F., Crosetto, M., Montserrat, O. (2012) Factors that have an influence on time series. *Proceedings of Fringe 2011 Workshop*, September 19–23, 2011, Frascati, Italy. ESA
- Notti, D., Davalillo, J.C., Herrera, G., Mora, O. (2010) Assessment of the performance of X-band satellite radar data for landslide mapping and monitoring: Upper Tena valley case study. *Natural Hazards Earth System Science* 10, 1865–1875.
- Papanikolaou D., Fountoulis I., Metaxas C. (2007) Quaternary paleogeography at Kyparissiakos Gulf (SW Greece) deduced from onshore and offshore data. *Quaternary International* 171-172, 14-30.
- Parcharidis, I., Fomelis, M., Kourkouli, P., Wegmuller, U. (2009) Persistent Scatterers InSAR to detect ground deformation over Rio-Antirio area (Western Greece) for the period 1992-2000. *Journal of Applied Geophysics* 68 (3), 348-355.
- Piyush Agram (2015) InSAR time series a quick introduction, Jet Propulsion Laboratory.
- Rocca A., Mazzanti P., Bozzano F., and Perissin D. (2015) Advanced characterization of a landslide-prone area by satellite a-DInSAR. *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 5*, Springer International Publishing Switzerland
- Rucci, A., Ferretti, A., Monti Guarnieri, A., Rocca, F. (2012) Sentinel 1 SAR interferometry applications: the outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing Environment* 120, 156–163.

- Simons M., and Rosen P.A. (2015) Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy. *Treatise on Geophysics*, 2nd edition 3, 339-385.
- Sun Q., Zhang L., Ding X.L., Hu J., Li Z.W., Zhua J.J. (2015) Slope deformation prior to Zhouqu, China landslide from InSAR time series analysis. *Remote Sensing of Environment* 156, 45-57.
- Usai, S., 2003. A least squares database approach for SAR interferometric data. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 41 (4), 753–760 (part 1).
- Varnes D.J. (1978) Slope movement types and processes, in Schuster R.L., and Krizek R.J. eds. *Landslides – Analysis and control: National Research Council, Washigton, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176*, 11-33.
- Vöge M., Frauenfelder R., Ekseth K., Arora M.K., Bhattacharya A., Bhasin R.K. The use of SAR interferometry for landslide mapping in the Indian Himalayas. 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11–15 May 2015, Berlin, Germany.
- Wasowski Janusz & Bovenga Fabio (2014) Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. *Engineering Geology* 174, 103-138.
- Werner, C., Wegmuller, U., Strozzi, T., and Wiesmann, A. (2003) Interferometric point target analysis for deformation mapping. *IGARSS '03, Toulouse, France*, 21-25 July.
- WP/WLI – International Geotechnical Societies UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1995) A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *International Association Engineering Geology Bulletin* 52, 75-78.
- Yanan J., Mingsheng L., Zhiwei Z., Xuguo S., Lu Z., Time B. (2016) Landslide deformation analysis by coupling deformation time series from SAR data with hydrological factors through data assimilation. *Remote Sensing* 8, 179
- Zhao J-L., Chen, J-P., Guo, X-F., Fan, J-H (2009) Application of PSInSAR for monitoring urban subsidence in Beijing. *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Russia* 739-743.